

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Пушкарев А.Е.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ВЛИЯНИЯ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА КАРЬЕРНЫЕ АВТОСАМОСВАЛЫ.....	11
1.1 Современное состояние транспортных систем горных предприятий на основе большегрузных карьерных автосамосвалов	11
1.2 Существующие подходы к учету негативного влияния горнотехнических условий эксплуатации на надежность узлов автосамосвалов	17
1.3 Методы и средства учета влияния горнотехнических факторов технологических трасс транспортирования	24
1.4 Существующие методические подходы к повышению надежности узлов карьерных автосамосвалов	33
1.5 Выводы по Главе 1	38
ГЛАВА 2 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРАСС ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ НА СОКРАЩЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ПОДВЕСОК КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ	41
2.1 Анализ влияния осложненных горнотехнических условий эксплуатации на надежность узлов карьерных автосамосвалов на примере отдельных железорудных месторождений	41
2.2 Обоснование выбора инструментов для оценки негативного влияния горнотехнических условий эксплуатации на срок службы подвесок карьерных автосамосвалов	47
2.3 Установление группы параметров технологических трасс транспортирования, обусловленных осложненными горнотехническими условиями.....	55
2.4 Связь параметров технологических трасс транспортирования с системами разработки месторождений открытым способом	62

2.5 Обоснование выбора самосвалов для установления зависимости сокращения срока службы их подвесок	66
2.6 Выводы по Главе 2	74
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ГРУППЫ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРАСС ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ НА СОКРАЩЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ПОДВЕСОК КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ.....	76
3.1 Определение геометрических параметров участков рассматриваемых маршрутов	76
3.1.1 Установление величины давления в подвесках на участках технологических трасс транспортирования горной массы	82
3.1.2 Выявление зависимости между параметрами трасс транспортирования и величиной сокращения срока службы подвесок.....	84
3.2 Обоснование критерия рационализации межремонтного периода подвесок карьерных автосамосвалов	86
3.2.1 Установление закона распределения отказов подвесок по их наработке до отказа	88
3.2.2 Учет планово-экономических показателей при обосновании критерия рационализации межремонтного периода	91
3.2.3 Учет применяемой предприятиями стратегии обслуживания и ремонта узлов автосамосвалов	93
3.2.4 Установление ряда значений рационального межремонтного периода подвесок для парка карьерных автосамосвалов, участвующего в исследовании ..	95
3.3 Выводы по Главе 3	98
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА И ОПРОБОВАНИЕ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО МЕЖРЕМОНТНОГО ПЕРИОДА ПОДВЕСОК КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ	99

4.1 Связь длительности аварийного ремонта подвесок с их межремонтным периодом	99
4.2 Алгоритм определения рационального межремонтного периода подвесок карьерных автосамосвалов	101
4.3 Результаты применения предлагаемого алгоритма при обосновании мероприятий по поддержанию установленного уровня надежности	104
4.4 Выводы по Главе 4	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	112
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	115
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт внедрения	129
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	130

ВВЕДЕНИЕ

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, задействованных 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, обрабатываемых 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 (Приложение А).

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, среднегодовое 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, обосновании выводов и рекомендаций.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 4 печатных работах (пункт из списка литературы №16, 17, 24, 104), 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 (Приложение Б).

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 подготовке работы, а также к.т.н., доценту Лавренко Сергею Александровичу за ценные научные консультации, наставления и поддержку.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ВЛИЯНИЯ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА КАРЬЕРНЫЕ АВТОСАМОСВАЛЫ

1.1 Современное состояние транспортных систем горных предприятий на основе большегрузных карьерных автосамосвалов

В настоящее время на предприятиях горной отрасли во всем мире сложилась устойчивая тенденция к увеличению объемов добычи полезных ископаемых открытым способом. Так в России открытым способом добывается свыше 60% угля, 90% железной руды, 70% руд цветных металлов и почти 100% строительных материалов [8].

Исследователями отмечалось, что основная задача предприятий горной отрасли состоит в том, чтобы на уже функционирующих объектах найти резервы роста эффективности ведения открытых горных работ [107]. Таким образом, возникнет необходимость в рационализации технологических процессов, сопровождающих проведение горных работ как комплексного процесса с целью повышения количества производимой работы и их качества в единицу времени, при сокращении используемых ресурсов, необходимых для их проведения [58].

При проведении открытых горных работ, по разным оценкам, около 97% всех производимых операций механизировано. Следовательно, в рамках решения обозначенной выше задачи, вопрос рационализации эксплуатации используемой техники и оборудования становится ключевым. Известно, что наибольшие расходы при добыче полезного ископаемого связаны с его транспортированием (рисунок 1.1) и в среднем составляют 45% [87].

При ведении горных работ открытым способом в России, странах СНГ и большинстве ведущих горнодобывающих стран мира самым распространённым видом транспорта стал карьерный автосамосвал, на долю которого приходится свыше 75% от всей перевезенной горной массы, а в таких странах как США, Канада и Австралия – около 100% [87]. Это стало возможно за счет его ключевых преимуществ перед другими видами транспорта, среди которых наиболее

важными при сложных условиях эксплуатации являются: независимость от источников энергии, большая маневренность, высокая мобильность и взаимная независимость работы автосамосвалов позволяют широко применять их на строительстве карьеров, при разработке сложноструктурных месторождений с неправильными контурами и малыми размерами карьерных полей [23, 74].

Однако, наряду с перечисленными выше преимуществами, карьерный автотранспорт обладает и рядом недостатков, а именно: наибольшее значение удельных затрат на транспортирование в сравнении с другими видами транспорта, зависимость от климатических условий, высокая стоимость самих машин и их содержания, незначительные экономически выгодные расстояния транспортирования [85], большой расход горюче-смазочных материалов (ГСМ), резкое ухудшение технико-экономических показателей при увеличении расстояния транспортирования [74].

Видный специалист в области карьерного автотранспорта, заслуженный деятель науки и техники РФ профессор А.А. Кулешов, утверждал, что одним из наиболее важных вопросов развития автосамосвалов, наряду с оптимизации энергозатрат на транспортирование и повышением экологической безопасности при их эксплуатации, должен стать учет и контроль работы не только в целом подсистемы карьерного автотранспорта в общей системе горно-обогатительного комбината (ГОК), но и каждого автосамосвала, каждого его агрегата, узла, что создает базу для построения системы технического обслуживания и ремонта машин на современном уровне, позволяет определять на основе положений теории надежности требуемое количество запасных частей, оборотных агрегатов и узлов [45, 46].

По мнению видных деятелей науки, академиков РАН К.Н. Трубецкого [78] и Н.Н. Мельникова [14], современное состояние горнодобывающей отрасли, как в России, так и во всем остальном мире, характеризуется тенденцией к стремительному росту глубины ведения горных работ, что увеличивает коэффициент вскрыши и расстояние транспортирования, а также отрицательно влияет на безопасность проведения работ, что, как следствие, увеличивает

себестоимость добычи полезных ископаемых. При этом на многих месторождения твердых полезных ископаемых в России отрабатываемых открытым способом, проектное значение глубины текущая глубина ведения горных работ приблизилась к отметке в 600м, а проектная достигает в отдельных случаях до 700-850м (таблица 1.1) [20]. К тому же, ряд ученых отмечает, что проектная глубина в отдельных случаях при открытой разработке может достигать значений до 1000м и более [99, 104].

Таблица 1.1 – Параметры глубины некоторых карьеров на месторождениях РФ [14, 20, 90, 99, 104]

ГОК	Карьер	Вид полезного ископаемого	Текущая глубина, м	Проектная глубина, м
Наталкинский	рудник им. Матросова	Золото	100	585
Ломоносовский	тр. Архангельская	Алмазы	179	324
	тр. Карпинского-1		130	260
Юбилейный	тр. Юбилейная		320	720
Удачный	тр. Удачная		610	730
Качканарский	Западный	Железная руда	272	300
	Северный		178	
	Главный		172	
Ковдорский	рудник Железный			450
Томинский		Медно- порфировые руды	210	358
Михеевский			100	540

Рост глубины горизонта, на котором формируется грузопоток, неизбежно увеличивает плечо транспортирования, снижаются радиусы поворотов при маневрировании, что приводит к значительному падению производительности транспортных систем. Кроме того, из-за роста глубины отрабатываемых карьеров происходит неизбежное усложнение горнотехнических условий эксплуатации карьерного транспорта: увеличивается уклоны трасс съездов, повышается величина коэффициента трения качения, сужается ширина технологической дороги и т.д. Что также негативно сказывается на надежности узлов и агрегатов задействованных карьерных автосамосвалов.

В диссертационной работе К. В. Бурмистрова, посвященной разработке геотехнических решений, направленных на обеспечение устойчивости

функционирования предприятий, отрабатывающих крутопадающие месторождения [20], отмечалось, что при длительной разработке рассматриваемого типа месторождений неизбежен значительный рост глубин ведения работ. При этом, для работы карьерного автотранспорта становится характерным ряд проблем, среди которых наиболее значимыми являются следующие:

- значительное увеличение плеча транспортирования горной массы;
- рост доли движения транспорта по наклонным выработкам;
- появление дополнительных ограничений к фронту ведения выемочно-погрузочных работ;
- частое перемещение транспортных коммуникаций, внутрикарьерных пунктов перегрузки и т.д.;
- усложнение ремонтных работ, вызванное нецелесообразностью перемещения транспортных средств на поверхность [20].

Еще одним крайне важным следствием роста глубины ведения погрузочных работ на карьерах глубинного вида является формирование новых требований к транспортной технике [78]. В последние 30 лет прослеживается тренд на увеличение грузоподъемности карьерных автосамосвалов, за счет чего становится возможным обеспечить формирующийся на больших глубинах грузопоток, и, к тому же, значительно снизить расходы на транспортирование при работе в комплексе с выемочными машинами высокой производительности. Так, например, при увеличении нормативной грузоподъемности самосвала со 100 до 300 тонн, затраты связанные с транспортированием снижаются на четверть [2, 60]. Показательным примером описываемой тенденции является опыт компании ОАО БЕЛАЗ, на чью долю продукции приходится большинство используемых в России карьерных автосамосвалов [60], которая для удовлетворения возрастающего спроса на машины грузоподъемностью 90 тонн и выше в 2012 представила сразу 6 принципиально новых моделей карьерных автосамосвалов, в том числе крупнейший в мире БЕЛАЗ-75710 с грузоподъемностью 450 тонн [2].

Однако, несмотря на значительные успехи в конструировании и изготовлении машин нового класса, надежность последних по-прежнему уступает своим зарубежным аналогам. Так, для автосамосвалов *Terex TR100* и *Caterpillar 777E* (грузоподъемность 91т), *Komatsu785D* (грузоподъемность 170т), предельный срок службы составляет приблизительно 60–70 тысяч моточасов, в то время как для автосамосвалов аналогичных классов производства компании БЕЛАЗ, значение этого показателя составляет 30–35 тысяч моточасов [9]. Для решения этой проблемы на некоторых предприятиях горной отрасли в России собственными силами службы механика ГОКа зачастую производится кустарная модернизация конструкции отдельных наиболее проблемных механических узлов и агрегатов (рисунок 1.1), среди которых представители горных предприятий чаще всего выделяют раму, кузов, элементы подвески и гидросистемы [18, 28].

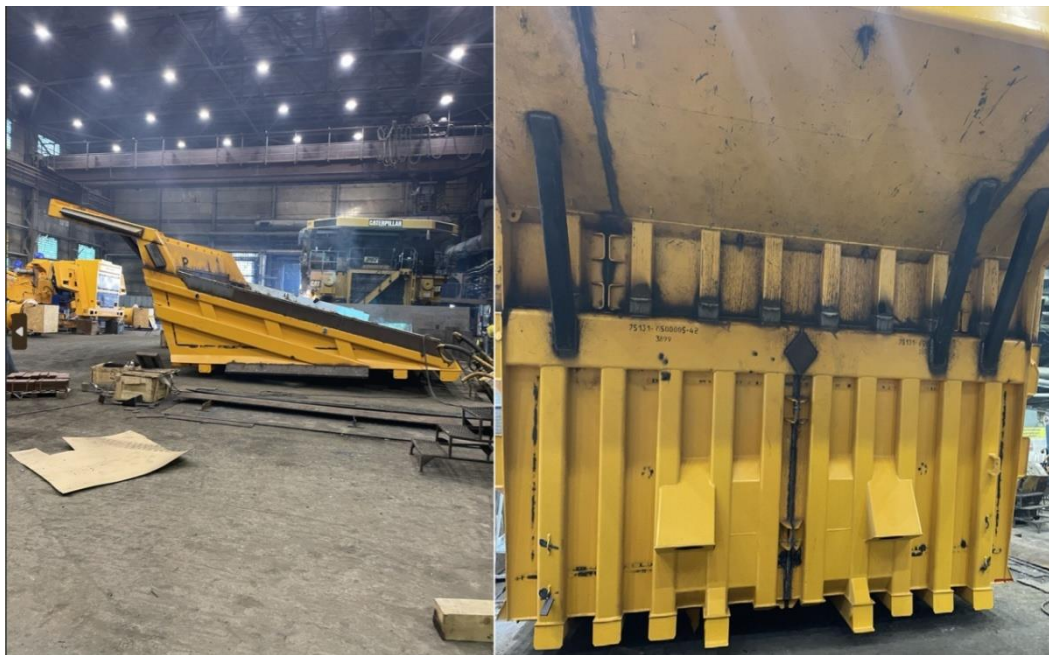


Рисунок 1.1 – Пример кустарного усиления жесткости кузова БЕЛАЗ–75131 и его футеровки, производимого собственными силами ремонтно-механического цеха АО «Ковдорский ГОК» (фото автора)

Иным же подходом, реализуемым как предприятиями горной отрасли, так и проектными организациями является повышение эффективности эксплуатации горной техники, что чаще всего достигается за счет рационализации режимов

ее работы, повышения показателей надежности машин и т.д. В рамках решения обозначенных задач следует выделить следующие работы:

– В. Л. Яковлев в своих исследованиях [98, 99, 102] решал проблемы, связанные с формированием транспортных систем на карьерах с большой глубиной. Им рассматривались вопросы взаимосвязи транспортной техники с режимами ведения горных работ по вскрытию новых и отработке существующих горизонтов, измельчению и складированию добытого полезного ископаемого с целью установления рационального выбора вида, моделей и параметров транспорта на различных этапах «жизненного цикла» карьеров, а также определения границ между ними.

– А. А. Кулешов в своей докторской диссертации [49] затрагивал вопросы оценки влияния внешней среды на выходные параметры горных транспортных систем посредством совокупного учета нагрузок на основные несущие элементы пневмоколесного горного транспорта, оценки причин и значений простоев машин в ходе их эксплуатации и т.д. Одним из конечных результатов стало установление принципов оптимизации систем карьерного автотранспорта.

– Ю.И. Лель в ряде своих работ [50, 51, 57] обосновывал методы оценки негативного влияния горнотехнических условий эксплуатации на параметры устойчивости автосамосвалов транспортных систем при помощи критериев энергетической эффективности, выведенных исходя из анализа массива данных, накопленных системами удаленного мониторинга текущего и технического состояния машин.

– Л. И. Андреевой в докторской диссертации [5] был разработан метод формирования организации технического обслуживания карьерных автосамосвалов, основанный на установлении экономически целесообразного уровня их работоспособности, являющим собой совокупность надежности, безопасности, экологичности, а также эффективного использования ресурса узлов рассматриваемых машин.

– И. В. Зырянов в своих трудах [30, 34] обосновал понятие экстремальных условий эксплуатации, как синтез климатических, горнотехнических и дорожных

условий, с учетом которого были разработаны математические модели динамических процессов протекающих при функционировании автосамосвалов с целью установления их влияния на ресурс несущих конструкций. Они послужили основой для совершенствования различных аспектов связанных с техническим обслуживанием и ремонтом (ТОиР) карьерных автосамосвалов, за счет чего была обоснована методика управления ресурсом этих машин, способствовавшую решению проблемы обеспечения устойчивой и эффективной работы автосамосвальных транспортных систем эксплуатируемых в экстремальных условиях.

– К. Ю. Анистратов в своих исследованиях [8, 9] установил влияние значительно изменяющихся природно-технологических условий глубоких карьеров на формирование структуры комплексной механизации горных работ, в том числе и карьерных автосамосвалов.

Таким образом, следует сделать вывод, что ключ к повышению эффективности предприятий горной отрасли, использующих открытый способ разработки месторождений, лежит в совершенствовании эксплуатации именно этого вида горных транспортных машин [15].

1.2 Существующие подходы к учету негативного влияния горнотехнических условий эксплуатации на надежность узлов автосамосвалов

Практика создания и применения большегрузных средств карьерного автомобильного транспорта свидетельствует о том, что основные конструктивные параметры автосамосвалов, выбор типа трансмиссии, подвесок и других агрегатов и систем, а также основные технико-экономические показатели автосамосвалов зависят от условий их эксплуатации [91]. Соответствие конструктивных параметров автосамосвалов эксплуатационным условиям влияет на экономичность этого автомобиля, определенную производительностью и затратами на его эксплуатацию, техническое обслуживание и ремонт [91].

При выявлении закономерностей между условиями эксплуатации при отработке месторождения открытым способом, конструктивными особенностями используемых видов автосамосвалов, дорожными, производственными и

климатическими условиями, А. А. Кулешов выделял следующие четыре группы условий, оказывающих негативное влияние на надежность горной техники [35]:

1. Условия, определяемые непосредственно горнотехническими факторами карьеров, как по отдельности, так и в различных сочетаниях, а именно:

- глубина карьера;
- расстояние транспортирования горной массы;
- протяженность наклонных участков пути на трассе;
- плотность перевозимой горной массы;
- крепость пород.

2. Условия, определяемые конструктивными параметрами, транспортных средств и коммуникаций:

- средний и максимальный уклон пути;
- коэффициент сопротивления качению;
- доля подъездных путей в общей протяженности трассы;
- число поворотов на трассе;
- средний и минимальный радиус поворота;
- техническая скорость автосамосвала.

3. Условия, определяемые структурой предприятия и организацией процессов технического обслуживания и ремонтов:

4. Климатические условия [35, 91].

Не случайно то, что среди всех перечисленных отдельных условий большинство связаны с технологическими трассами транспортирования горной массы. Как отмечалось в научной литературе, это объясняется тем, что в структуре времени рейса карьерного автосамосвала (рисунок 1.2), наибольшей среди всех операций длительностью обладает непосредственное движение между точками погрузки и разгрузки, осуществляемое по участкам технологических трасс транспортирования горной массы [107, 107].



Рисунок 1.2 – Удельный по времени вес технологических операций в общей структуре рейса автосамосвала на Ломоносовском ГОКе АО «Севералмаз» [109]

Несмотря на широкое использование понятий, связанных с условиями эксплуатации горной техники (горно-геологические, горнотехнические, гидрогеологические, геомеханические и т.д.), не существует универсального общепринятого классифицирующего признака, применяемого всеми авторами применительно ко всем видам горной техники. Поэтому при разных видах выполняемых техникой работ (отделении породы от массива, геологической разведке, креплении кровли выработок и т.д.), одни и те же факторы различными авторами могут быть отнесены к разным категориям. Для дальнейшей работы, к понятию горнотехнические условия эксплуатации будут относиться все те факторы, которые определяются системой разработки месторождения полезного ископаемого [80].

Схожим образом обстоит вопрос дефиниции понятий «сложные и осложненные условия». Несмотря на его широкое распространение, в горнотехнической литературе эти термины также не имеют однозначности в их понимании. Ряд авторов, говоря о сложных условиях, имеют в виду большую обводненность, другие – наличие слабых, неустойчивых пород, третьи –

опасность проявлений всевозможных динамических явлений (горные удары, выбросы и т. д.) [63, 80].

В рамках дальнейшей работы, под понятием «осложненные условия» следует понимать такие условия, в которых ведение горных работ с установленной производительностью без каких-либо дополнительных мероприятий по обеспечению безопасности и комфортности труда невозможно по техническим, экономическим или санитарно-гигиеническим причинам оказывается менее целесообразным, чем с применением специальных способов, либо практически невозможным [80].

Помимо обозначения и классификации условий эксплуатации карьерных автосамосвалов, рядом ученом предпринимались попытки установления единого интегрального показателя учета негативного влияния условий эксплуатации на эффективность функционирования карьерных автосамосвалов. Таким образом, В.В. Ржевским был предложен нашедший широкое применение показатель трудности транспортирования породы P_T , определяемый согласно выражению (1.1) [70]:

$$P_T = K_1 \gamma + K_2 d_{\text{ср}} (1 + 0,1 \sigma_{\text{сдв}}) + K_3 W n [1 + \lg(T + 1)] (1 - 0,025t), \quad (1.1)$$

где γ – плотность породы, кг/м³;

$d_{\text{ср}}$ – средний размер кусков породы в транспортном сосуде, м;

$\sigma_{\text{сдв}}$ – сопротивление породы сдвигу в образце, МПа;

W – влажность перевозимой породы (в долях от единицы);

n – содержание в породе глинистых частиц (в долях от единицы);

T – продолжительность транспортирования породы, ч;

t – температура окружающей среды (учитывается только при отрицательных температурах), °С;

K_1, K_2, K_3 – эмпирические коэффициенты [70].

Среди наиболее важных предпосылок к установлению данного показателя отмечалось следующее:

– такие физико-механические свойства перевозимой горной массы как кусковатость, прочность и плотность оказывают заметное влияние на выбор транспортных средств, степень использования вместимости и износостойкость;

– содержание глинистых частиц и влажность пород влияют на трудность разгрузки породы ввиду налипания и примерзания горной массы к рабочим поверхностям исполнительных органов погрузочных и кузовам транспортных машин;

– негативные эффекты, связанные с налипанием и примерзанием зависят от времени транспортирования горной массы и температуры окружающей среды [70].

Таким образом, согласно величине предлагаемого критерия, транспортируемые породы подразделяются на классы (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Классы транспортируемой открытым способом породы по показателю трудности В. В. Ржевского [70].

Номер класса	Характеристика пород	Значение показателя трудности
I класс	Весьма легкотранспортируемые	$P_T \leq 2$
II класс	Легкотранспортируемые	$2 < P_T \leq 4$
III класс	Средней трудности транспортирования	$4 < P_T \leq 6$
IV класс	Труднотранспортируемые	$6 < P_T \leq 8$
V класс	Весьма труднотранспортируемые	$8 < P_T \leq 10$
Внекатегорийные		$P_T > 10$

Развитию идей, заложенных В. В. Ржевским, посвящены труды профессора Ю. И. Леля. В них при создании методов учета негативного влияния горнотехнических условий [35], связанных с трассами транспортирования, был создан единый комплексного показатель, отражающий горнотехнические условия, негативно влияющие на эффективность эксплуатации карьерных автосамосвалов при их непосредственном функционировании. Ю.И. Лелем было предложено применять для решения поставленной задачи энергетический принцип, так как расход энергии, возникающей при сжигании дизельного топлива, наиболее точно отражает изменение условий эксплуатации технологического автотранспорта [57].

В предлагаемой методике вводилось понятие коэффициента сложности трассы, как отношение расстояния транспортирования приведенного к горизонтальному и единым типом покрытия к длине реальной трассы согласно энергетическому критерию.

Таким образом, вводилось понятие удельного действия, как физической величины, представляющей собой произведение количества энергии, расходуемой на перемещение горной массы транспортным средством, и времени его перемещения. Введенное понятие удельного действия представляет собой произведение удельных затрат энергии на подъем горной массы транспортным средством на 1 м и времени подъема горной массы на 1 м, $[\frac{\Gamma \cdot \text{с.м}}{\text{т} \cdot \text{км}}]$ [57].

Важность энергетического критерия для оценки различных аспектов карьерных автосамосвалов в достаточной степени была обозначена в научной литературе как для решения таких задач как: выбор рациональной модели автосамосвала при формировании комплексов с экскаваторами [26, 41, 43, 48, 72], определение величины расхода топлива [57, 76] , рационализация режимов работы техники [34, 42, 98], построение интеллектуальных транспортных систем [117].

Для достижения поставленных задач, в качестве показателей оценки трудности транспортирования горной массы карьерных автосамосвалов предлагалось учитывать такие критерии как расстояние транспортирования, высота подъема (спуска) горной массы, руководящий уклон трассы, качество дорожного покрытия, сложность трассы в плане и другие факторы в различном их сочетании [57, 100, 101].

Таким образом, была получена расчетная формула (1.2) для определения коэффициента сложности трассы при работе на подъем горной массы [76]:

$$\mu = \frac{k_3(k_T + k_R)(\omega_i + i_{\text{п}})}{\omega_0[k_T(1 + k_1 k_2) + k_R]}, \quad (1.2)$$

где k_3 – коэффициент, учитывающий расход топлива при движении порожних при подъеме в тормозном режиме;

k_T – коэффициент тары самосвала;

k_r – коэффициент использования грузоподъемности;

ω_i – коэффициент сопротивления качению груженых автосамосвалов на автодороге с не стандартным покрытием;

i_n – руководящий уклон при движении на подъем горной массы;

ω_0 – коэффициент сопротивления качению груженых автосамосвалов на автодороге принятым стандартным покрытием;

k_1 – коэффициент, учитывающий увеличение ω_0 при движении порожних автосамосвалов;

k_2 – коэффициент, учитывающий увеличение удельного расхода дизтоплива при номинальной нагрузке при движении порожних автосамосвалов [57, 76].

Соответственно, при спуске коэффициент сложности трассы будет устанавливаться согласно выражению (1.3) [50, 57]:

$$\mu = \frac{k_1 k_2 k_4 k_T (\omega_i + i_c)}{\omega_0 [k_T (1 + k_1 k_2) + k_r]}, \quad (1.3)$$

где k_4 – коэффициент, учитывающий расход топлива при движении груженых автосамосвалов на спуск в тормозном режиме;

i_c – руководящий уклон при спуске [50, 57].

Согласно предлагаемому коэффициенту сложности трассы по энергетическому критерию также была предложена систематизация горнотехнических условий эксплуатации технологического карьерного транспорта [50].

Не смотря на большую значимость представленного метода в вопросе установления влияния совокупности горнотехнических условий эксплуатации карьерных автосамосвалов на один из ключевых эксплуатационных показателей автотранспорта как норма расхода топлива, нельзя не отметить, что использование энергетического критерия не позволяет в должной мере установить влияние условий эксплуатации карьерных автосамосвалов при перемещении по технологическим трассам транспортирования на прочие критерии эффективности функционирования карьерных автосамосвалов [90].

1.3 Методы и средства учета влияния горнотехнических факторов технологических трасс транспортирования

Как уже отмечалось выше, рост глубин карьеров приводит к формированию ряда требований при проведении технического обслуживания и ремонта автосамосвалов с целью обеспечения устойчивости производственного процесса. Для достижения обозначенной цели были разработаны различные инструменты, к наиболее распространенным среди них относятся системы удаленного мониторинга технического состояния, которые позволяют решать задачи по контролированию отклонений режимов работы, предусмотренных проектом, мониторингу установленных критериев эффективности функционирования, а также для оценки остаточного ресурса мониторируемых узлов.

Одним из ключевых инструментов для мониторинга технического состояния узлов и агрегатов горных машин служат интеллектуальные многоуровневые системы контроля, автоматизации и мультифункционального управления, созданные с учетом специфики, накладываемой горной промышленностью [65, 88]. Как правило, в научной литературе они носят название автоматизированных систем управления горнотранспортным комплексом (АСУ ГТК).

Зачастую, они включают в себя определенные классы комплексных специализированных информационных систем, непосредственно используемых в производственной деятельности предприятий:

- Диспетчерские системы оперативного управления процессами добычи и переработки полезных ископаемых;
- Системы геологического моделирования и планирования горных работ;
- Корпоративные системы управления производством;
- Многофункциональные системы безопасности горных работ [37].

На предприятиях горной отрасли России и СНГ рассматриваемые системы представлены следующими цифровыми продуктами: «*Wencomine*» (разработчик *Wenco*), «Карьер» (разработчик ООО «ВИСТ Групп») и «*Minestar*» (разработчик *Caterpillar*) [30]. Сравнительно недавно к этому перечню добавилась

интеллектуальная система мониторинга *IMS*, разработанная компанией БЕЛАЗ [13].

Подобные системы обладают четкой иерархией программно-аппаратного комплекса, классифицированной по аспектам управления горным предприятием на три уровня:

Нижний уровень. Включает в себя автоматизированную систему управления определенным технологическим процессом. На этом уровне происходит сбор и передача различной технологической информации с объектов, подвергнутых контролю и управлению, а именно параметров рудничной атмосферы, очистных и проходческих выработок и транспортных участков. Для решения установленных задач применяются датчики, промышленные контроллеры и *SCADA*-системы, передающие снимаемую информацию на более высокий уровень [18, 25].

Средний уровень. Включает в себя управление производственными процессами на уровне цеха или же управления фондами, техническим обслуживанием и ремонтами, складом запасных частей и расходных материалов, финансами, а также геоинформационные системы (ГИС). На этом уровне происходит переработка, хранение и обработка полученных массивов информации, полученной с нижнего уровня [18, 25].

Высокий уровень. Глобальное планирование ресурсов предприятия: проведение анализа, управления и планирования финансово-хозяйственной деятельности предприятия и компании в целом [18, 25, 37, 87].

В контексте представленного исследования наибольший интерес представляет изучение аспектов функционирования и возможности практического применения систем управления горнотранспортным комплексом на среднем и низком уровнях.

С точки зрения программно-технической компоненты, АСУ ГТК включают в себя:

- бортовые технические средства, устанавливаемые на мобильном оборудовании;
- систему связи для передачи данных в режиме реального времени;

- компьютерное оборудование, включая серверы и рабочие станции пользователей;
- специальное программное обеспечение мониторинга и диспетчерского управления горнотранспортным оборудованием, ведения базы данных [1, 18, 30].

На каждую единицу техники, включенной в рассматриваемые комплексы, установлен комплект оборудования, включающий в себя бортовой промышленный компьютер, монитор с сенсорным экраном, радиоприемник системы *GPS* для определения местоположения и перемещения мобильного оборудования, радиостанцию для приема и передачи технологической и распорядительной информации [1, 18, 30].

Стоит отметить, что в структуре АСУ ГТК центральное место отведено автоматизации добычных процессов, диспетчеризации и принятии оперативных решений для управления парком техники, мониторинге эксплуатационных характеристик и текущего технического состояния, как отдельных узлов, так и всей машины в целом.

Проведение вышеописанных операций становится возможным благодаря удаленного мониторингу, передаче и хранению информации множества параметров узлов и деталей горной техники. Так, например, с современного карьерного автосамосвала БЕЛАЗ–75139 с электромеханической трансмиссией, оборудованный АСУ ГТК «Карьер», непрерывно снимаются параметры четырех групп:

- Системы контроля загрузки и топлива (СКЗиТ);
- Двигателя внутреннего сгорания (ДВС);
- Системы управления тяговыми электроприводами (СУТЭП);
- Гидравлическая системы [25].

С точки зрения оценки параметров трасс транспортирования горной массы наибольший интерес представляет подсистема мониторинга СКЗиТ. Ввиду того она обладает наибольшим числом мониторируемых параметров, прямо или косвенно связанных с технологическими трассами. Среди таковых стоит выделить следующие:

1. Динамический вес перевозимого груза;
2. Уровень топлива в баке;
3. Величина уклонов (продольного и поперечного);
4. Давление в цилиндрах подвесок;
5. Состояние динамического и рабочего тормозов;
6. Направление движения самосвала;
7. Данные по рейсам и сменам;
8. Давление и температура в шинах (при подключении системы контроля давления в шинах);
9. Состояние подвески и рамы;
10. Качество вождения;
11. Геопозиция (местоположение в пространстве) [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**, 25].

В ряде работ А. Ф. Клебанова [38, 42, 69] обосновывались преимущества применения АСУ ГТК «Карьер» суммарно на более чем 20 горно-обогатительных комбинатах РФ и СНГ. В результате их внедрения наиболее значимым отмечалось ожидаемое повышение эксплуатационной и экономической эффективности, что достигалось благодаря следующим усредненным показателям:

- снижение удельной нормы расхода горюче-смазочных материалов техники на 5–6%;
- повышение производительности одной среднесписочной единицы автосамосвала на 7–8%;
- увеличению коэффициента технической готовности на 7-10%;
- увеличение производительности одного автосамосвала на 3–15%.

К тому же, точный учет и мониторинг пробега и местоположения транспорта благодаря наличию средств GPS позволяет снизить расход топлива на 2-7%, снизить непроизводительные потери времени на 3-20%. Что приводит к росту среднему коэффициенту технической готовности парка техники в среднем на 6-8%, а его ежегодное снижение позволяет замедлить на 35% [59, 87].

Однако, не смотря на широкое распространение и постоянное улучшение систем автоматизированного управления горнотранспортным комплексом, их подсистема повышения надежности зачастую направлена исключительно на решение задачи по рационализации методов поддержания заданным уровнем надежности как всего парка, так и отдельных машин за счет совершенствования организации технического обслуживания и ремонта. Но ввиду того, что подобные системы позволяют получать, обрабатывать и сохранять информацию об оперативном состоянии регистрируемых параметров узлов и агрегатов, необходимо проанализировать существующие вспомогательные инструменты мониторинга технического состояния отдельных узлов посредством анализа параметров полученных посредством АСУ ГТК, но не включенных в них на базовом уровне.

Одним из наиболее широко используемых показателем эффективности функционирования горной техники является ее надежность, согласно ГОСТ 27.1012–2021, свойство объекта охранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в заданных режимах, условиях применения, стратегиях технического обслуживания, хранения и транспортирования.

На предприятиях горной отрасли, ведущих отработку месторождений открытым способом, как уже отмечалось выше, горнотехнические условия эксплуатации техники могут значительно варьироваться, даже в рамках одного карьера, что негативно влияет на надежность узлов и агрегатов горных машин [34]. При этом наибольшее негативное влияние сказывается на надежности следующих узлов карьерных автосамосвалов с электромеханической трансмиссией:

- несущая рама;
- бортовой редуктор и мотор-колесо;
- двигатель и система управления тяговым электроприводом;
- шины и колеса;
- элементы передней и задней подвесок [82, 83]

Среди множества показателей и критериев надежности, осложненные горнотехнические условия эксплуатации в наибольшей степени приводят к снижению средней наработки между отказами восстанавливаемых узлов, зачастую значительно меньшей, чем значение нормативной наработки между отказами, определяемое заводом-изготовителем техники [54, 66, 67].

В вопросе установления влияния горнотехнических параметров на показатели и критерии надежности узлов и агрегатов карьерных автосамосвалов, задействованных для транспортирования горной массы, стоит отметить опыт компании *Caterpillar* [75]. В своих материалах при исследовании причин отказов узлов в контексте параметров преодолеваемой трассы специалисты этой компании рассматривают три параметра: коэффициент сопротивления качению, продольный уклон участка трассы и высоту подъема [18, 105]. Отдельно выделяется то, что необходимо обеспечивать безопасную работу автосамосвалов, то есть ширина дорожного полотна, изгибания дорожного полотна, повороты, виражи должны укладываться в рамки, устанавливаемыми требованиями безопасности. Большое внимание уделяется изучению влияния сопротивления качению на эксплуатационные параметры и на производительность транспортных машин.

При помощи регистратора событий «*Data Logger*» возможно сохранять данные, поступающие с датчиков, в течение получаса и при необходимости выгружать их значения на подключенный к панели самосвала внешний персональный компьютер. Другим вариантом передачи снимаемых данных является передача по радиоканалу напрямую на сервер, установленный вне машины.

После получения данных становится возможной их обработка в компьютерной программе «*Caterpillar Fleet Production Optimization*» (FPO), позволяющей проанализировать загруженный массив информации и выдать возможные рекомендации по рационализации проведения технологических процессов.

Каждый автосамосвал производства этой компании в стандартной комплектации оборудован бортовым компьютером *VIMS*, необходимым в первую очередь для сбора и хранения информации, поступающей от датчиков, установленных на машину. Его компоновка представлена на рисунке 1.3.

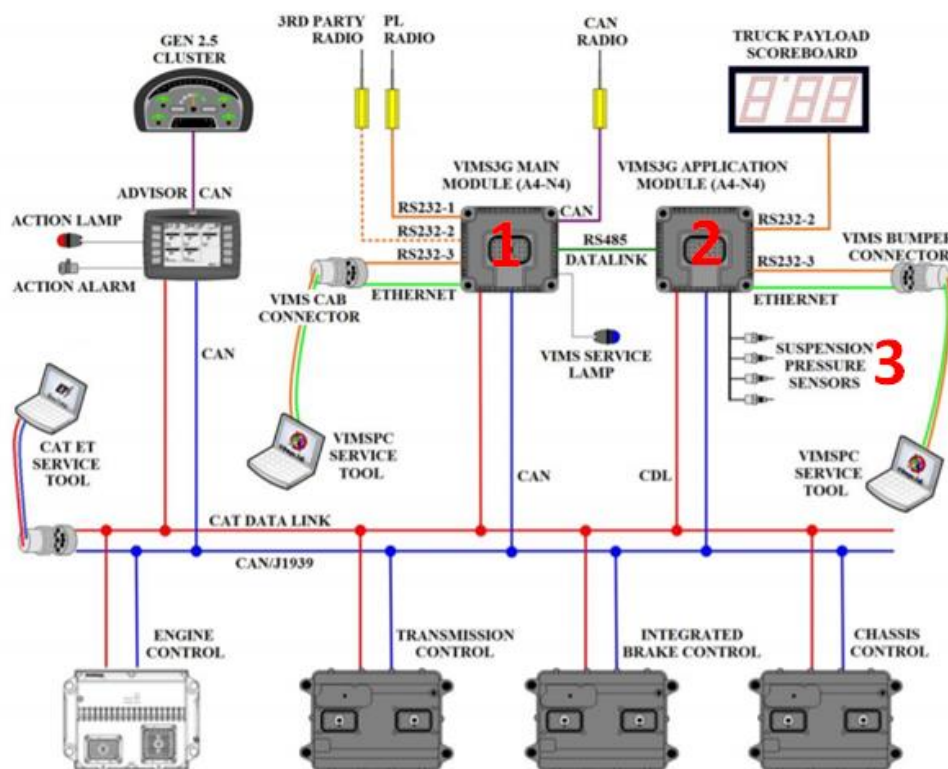


Рисунок 1.3 – Компоновка бортовой системы *VIMS*, устанавливаемой на автосамосвалах *Caterpillar*. 1 – главный блок *VIMS*; 2 – блок приложений *VIMS*: *TPMS*, *RAC*, *TKPH*, *TPS*, *CYCLETIMER*; 3 – датчики давления в каждой из 4 подвесок автосамосвала [75]

Одним из направлений рационализации в *FPO* является модуль определения качества технологических дорог. Его принцип действия основывается на снятии значения давления в каждом из четырех пневмогидроцилиндров подвески автосамосвала и сравнении его с остальными тремя.

В рамках разработанной ими методики используются значения давления в передних и задних подвесках самосвала, задействованного для непосредственного транспортирования горной массы от забоя до точки разгрузки, представленной отвалом вскрышных пород или промежуточным складом руды, скорости его

движения, и выбранной при этом передачи с положением дроссельной заслонки (рисунок 1.4).

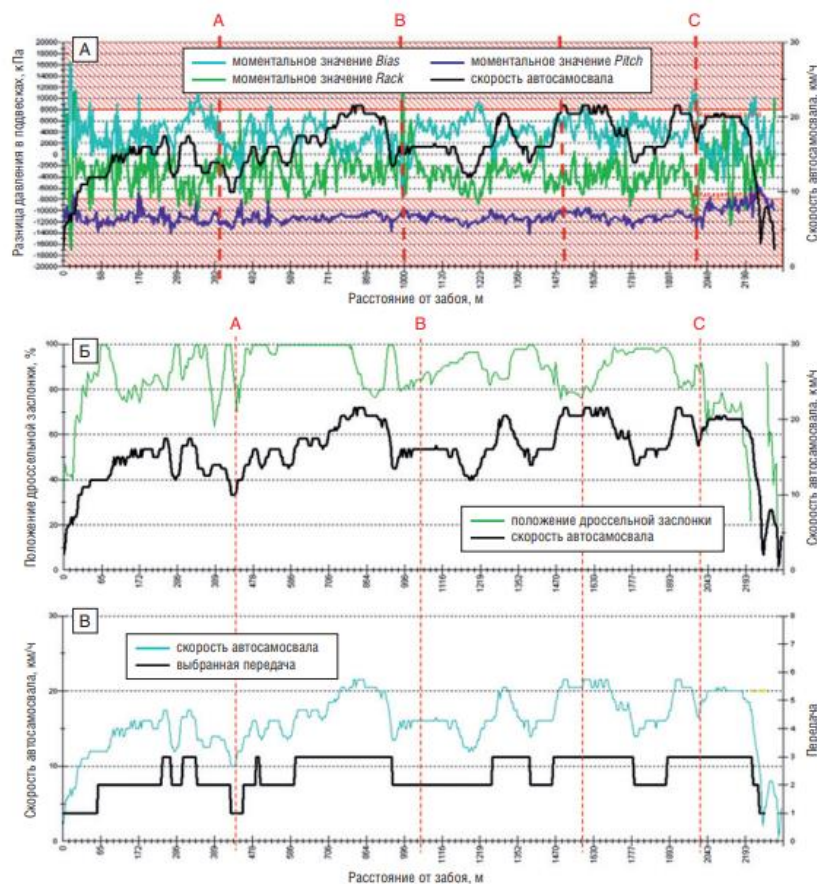


Рисунок 1.4 – Изменения давления в подвесках колес (А), положения дроссельной заслонки (Б) и скорость движения самосвала (В) [75]

Как следует из рисунка 1.3, давление в подвесках сравнивается в трех вариантах, а именно:

- *Rack*. Неравенство давлений в подвесках, расположенных по диагонали. Характеризует скручивающие раму диагональные нагрузки, возникающие при попадании груженого самосвала колесом в яму или при наезде на камень. Возникающие при этом нагрузки передаются на раму, колеса и другие основные узлы [75];

- *Pitch*. Разница суммарных давлений между передней и задней подвеской. Характеризуют продольные динамические нагрузки, распространяющиеся от передней оси к задней, возникающие при аварийном

торможении, проезде ям и наезде на препятствия, сопоставимым по размерам с шириной автосамосвала [75];

– *Bias*. Разница суммарных давлений между левыми и правыми подвесками. Характеризуют боковую раскачку рамы слева направо вдоль оси самосвала, вызванную неравномерной загрузкой кузова или высокой скоростью движения на неправильно профилированных виражах [75].

Результатом работы в этой программе является локализация участков трассы транспортирования, требующая проведения планировочных, ремонтных и строительных работ. Это становится возможным посредством анализа графических зависимостей между измеряемыми параметрами, скоростью движения автосамосвала и расстоянием от точки проведения погрузки [75]. Стоит отметить, что после локализации проблемных участков трассы, устанавливается процент их суммарной протяженности от общей длины трассы.

Несмотря на значительный интерес рассматриваемой методики и ее имплементацию в нормативные документы предприятий, регламентирующие ведение горных работ открытым способом, необходимо отметить, что она строится исключительно вокруг изменения технического состояния лишь одного узла автосамосвала – его рамы [111]. Однако, характеристики технологических трасс транспортирования горной массы, обусловленные осложненными горнотехническими условиями эксплуатации, также оказывают негативное влияние на техническое состояние и других узлов карьерных автосамосвалов, а именно: бортовой редуктор, мотор-колесо, двигатель, СУТЭП, шины, колеса и подвеску [82, 83, 113].

Во многих исследованиях, посвященных анализу причин отказов узлов и агрегатов карьерных автосамосвалов, задействованных в осложненных условиях эксплуатации, отмечалось, что среди всех элементов карьерных автосамосвалов различной грузоподъемности, эксплуатирующихся в осложненных горнотехнических условиях, наибольшее число отказов приходится на элементы их подвески (рисунок 1.5) [8, 18], а среди суммарной длительности нахождения в неработоспособном состоянии, возникшего вследствие отказа именно этого

узла, рассматриваемый узел стоит на втором месте, уступая лишь отказам двигателя внутреннего сгорания [4, 73]

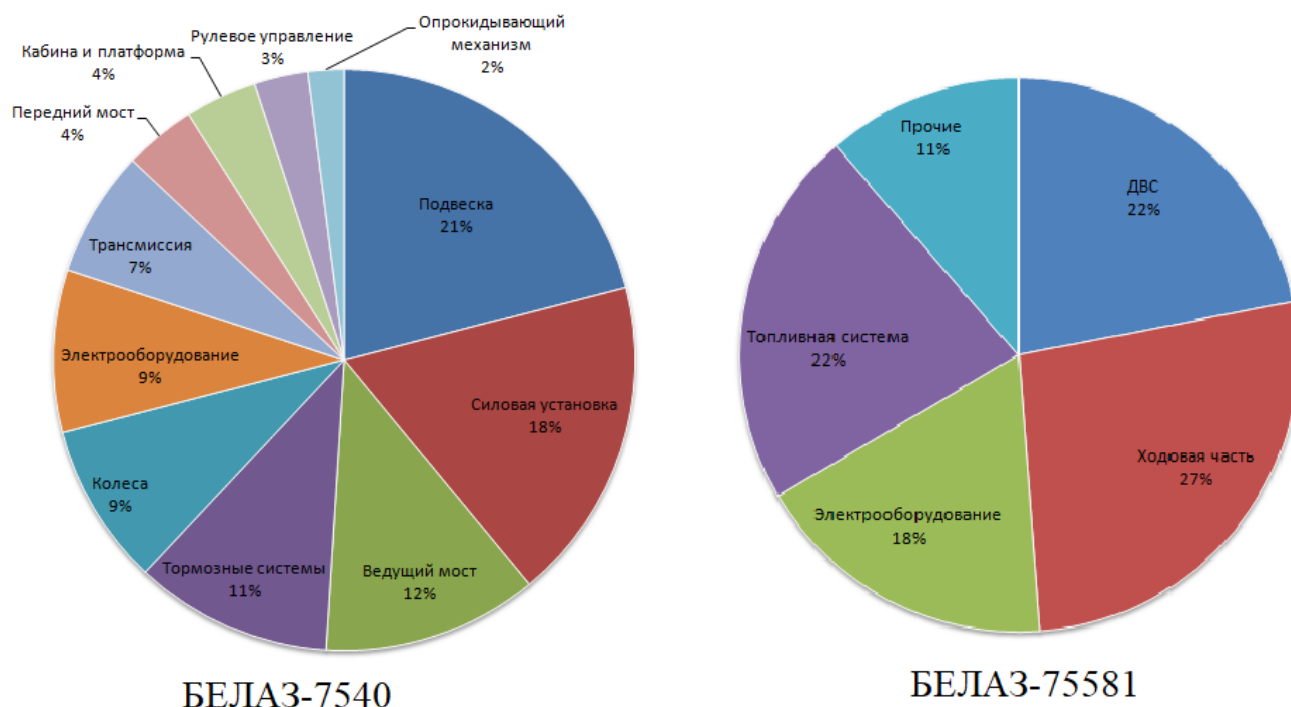


Рисунок 1.5 – Распределение отказов по узлам на примере автосамосвала БЕЛАЗ-7540 [18] и БЕЛАЗ-75581 [8]

Таким образом, на примере сразу нескольких моделей карьерных автосамосвалов, становится очевидным то, что повышение надежности именно их подвесок является ключевым в вопросе повышения надежности всего рассматриваемого типа машин.

1.4 Существующие методические подходы к повышению надежности узлов карьерных автосамосвалов

Известно, что на этапе создания машины закладывается ее конструктивный ресурс, определяемый параметрами и особенностями конструкции, заложенными при проектировании, выработка которого планируется на весь срок службы технологической машины. При этом ключевое влияние на последний оказывают внешние факторы, среди которых наиболее важными являются условия функционирования машины, качество управления, а также система и уровень

технического сервиса [4]. К последнему относят систему технического обслуживания и ремонта.

В настоящее время применительно к узлам и агрегатам карьерных автосамосвалов на предприятиях горной отрасли сложились следующие стратегии технического обслуживания и ремонта [11]:

1. Обслуживание по факту отказа или выработки ресурса объектом;

При этой стратегии объект подвергается восстановлению работоспособности при достижении предельного состояния. В настоящее время она широко представлена на горных предприятиях со сравнительно небольшими вложениями в сервисную службу, а также в отношении автосамосвалов со значительным сроком службы, для которых проведение капитальных ремонтов признано экономически нецелесообразным [114].

2. Обслуживание по регламенту или с планово-предупредительными ремонтами, проводимые согласно наработке объекта;

При этой стратегии машина систематически выводится из эксплуатации, узлы и агрегаты автосамосвалы подвергаются ТОиР до перехода в предельное состояние, без оценки их текущего состояния, за счет чего улучшается техническое состояние объектов, тем самым снижается вероятность их отказа. На предприятиях горной отрасли узлы и агрегаты автосамосвалов обслуживаются согласно этой стратегии сравнительно нечасто ввиду значительных затрат материальных средств на его проведение, а также стремлению сервисных служб ГОКов к максимальному использованию ресурса объекта [96].

3. Обслуживание по фактическому состоянию;

При этой стратегии машина систематически выводится из эксплуатации, однако ее узлы и агрегаты подвергаются диагностике и оценке текущего состояния, зачастую при помощи средств неразрушающего контроля, после чего принимается решение о продолжении дальнейшей эксплуатации объекта или о проведении ТОиР. Часто вывод из эксплуатации с целью диагностики сочетается с непрерывным удаленным мониторингом технического состояния мониторируемого объекта. На предприятиях горной отрасли эта стратегия зачастую

реализована частично, что обуславливается значительными требованиями к материальному оснащению диагностическими средствами и квалификации работников сервисных служб ГОКа. Так, например, сравнительно легко диагностируемые отказы, например значительное визуальное истирание протектора крупногабаритных шин, внедрено широко. Однако большинство узлов подвергаются диагностике и мониторингу сравнительно слабо, например, элементы СУТЭП [83].

Принято считать, что наиболее перспективной стратегией обслуживания и ремонта является комбинация обслуживания по регламенту и фактическому состоянию. Таковыми примерами являются различные системы, в каждой из которых, согласно различным методикам [6, 103, 114], производится оценка рисков отказа объекта.

При обосновании стратегии технического обслуживания и ремонта одним из ключевых направлений деятельности сервисных служб горных предприятий является определение рациональных объемов и сроков ремонтов (т.н. межремонтных периодов). Для установления последнего многие предприятия горной отрасли выбирают интервал, равный установленному в рекомендациях завода-изготовителя техники, разработанных на основе базовых (неосложненных) условий эксплуатации. Однако, как отмечалось выше, эксплуатация автосамосвалов в осложненных горнотехнических условиях приводит к тому, что фактический срок службы их узлов становится значительно меньше того, что закладывается заводом-изготовителем. Таким образом, становится актуальной задача по установлению влияния на величину сокращения срока службы подвесок как отдельных факторов, обуславливающих осложненные горнотехнические условия эксплуатации, так и их сочетаний.

Не смотря на очевидную практическую значимость установления подобной зависимости, помимо уточненного значения срока службы подвесок, в рамках сложившегося подхода на горных предприятиях к проведению технического обслуживания и ремонтов карьерных автосамосвалов в оценке рисков также немаловажными факторами являются различные экономические и

организационные аспекты, например стоимость проведения планового и аварийного ремонтов узлов [107]. Зачастую, горные предприятия, их сервисные и проектные организации, для выбора и обоснования наилучшей стратегии используют комплексный показатель экономической эффективности сервиса транспортной техники – потери от одного часа простоя машины [61], включающий в себя как прямые потери (стоимость оплат работ, расходных материалов, необходимых для восстановления работоспособности и т.д.), так и косвенные (недополученная предприятием прибыль от простоя машины). При этом, единой методики для его расчета не было разработано, т.к. каждое из предприятий использует свой перечень факторов, влияющих на итоговый показатель. Следовательно, применительно к выбору критериев применимых для установления рационального межремонтного периода подвесок следует выбрать следующие:

- допустимая для предприятия вероятность возникновения отказа узла (требуемый уровень безотказности узла);
- фактический срок службы узла, выраженный в разнице между нормативным сроком службы и величиной его снижения;
- потери от одного часа простоя машины, вызванного отказом подвесок, включающий в себя различные виды затрат на проведение мероприятий по восстановлению работоспособности рассматриваемого узла.

На основании их совокупного влияния следует уточнять существующие методики поддержания установленного уровня надежности. Последние зачастую бывают направлены на повышение одного из пяти показателей надежности: безотказности, сохраняемости, долговечности, восстанавливаемости или ремонтпригодности. В виду того, что, как отмечалось выше, частота отказов подвесок автосамосвалов является наибольшей среди всех узлов этих машин, а суммарное время вызванных в связи с ними простоев занимает второе место, то с целью повышения надежности всей машины следует повышать именно ремонтпригодность этого узла. Согласно ГОСТ Р 27.102-2021 «Надежность в технике», под ремонтпригодностью понимают свойство объекта, заключающееся

в его приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособности объекта путем технического обслуживания и ремонта. Ремонтопригодность характеризуется временем восстановления после отказа. Следовательно, снижение среднего времени восстановления работоспособности после отказа подвесок карьерных автосамосвалов, является актуальной задачей для решения вопроса по повышению эффективности эксплуатации рассматриваемого вида машин.

В существующих исследованиях отмечалось, что «за последние десятилетия значительных успехов в снижении значений такого важного показателя эффективности в горном производстве, как время простоя основного оборудования, добиться не удалось» [73]. Понятие простоя отражено в ГОСТ Р 27.101-2021 «Надежность выполнения задания и управление непрерывностью деятельности», где утверждается, что состояние простоя – это состояние, в котором объект не может функционировать по любой причине. Как следует из того же нормативного документа, простои разделяют на следующие виды:

- административный простой, возникающий при выполнении операций технического обслуживания объекта, связанный с административными причинами;
- технический простой, связанный с выполнением вспомогательных технических операций, связанных с техническим обслуживанием, но не являющихся действиями технического обслуживания;
- логистический простой, связанный с обеспечением ресурсами, необходимыми для выполнения действий технического обслуживания (за исключением административных простоев);
- простой по внешним причинам, связанный с отсутствием внешних ресурсов.

Таким образом, установление рационального межремонтного периода подвесок карьерных автосамосвалов, эксплуатируемых в осложненных горнотехнических условиях, при обосновании регламента технического обслуживания и ремонта рассматриваемого узла позволит подготовить

материальную базу сервисных служб для проведения соответствующих операций по восстановлению работоспособности объекта, например, выделить место в ремонтном цеху, закупить и доставить необходимые ресурсы и т.д. Тем самым, снизить продолжительность логистических простоев и, как следствие, уменьшить среднее время аварийного ремонта подвесок карьерных автосамосвалов.

1.5 Выводы по Главе 1

Анализ особенностей функционирования горных предприятий, ведущих отработку месторождений твердых полезных ископаемых показал, что глубина рабочих горизонтов значительно увеличилась за последние 20 лет, что привело к значительному осложнению условий эксплуатации техники, задействованной при ведении горных работ. Это приводит к формированию новых требований по повышению эффективности функционирования карьерных автосамосвалов, как наиболее широко применяемого вида машин, обеспечивающих транспортирование горной массы, наиболее энерго- и ресурсозатратную операцию при добыче полезного ископаемого.

Предлагаемые в настоящее время подходы по анализу факторов, обуславливающих осложненные горнотехнические условия эксплуатации техники, а также их интегральных показателей, лишь отчасти отражают негативное влияние на эксплуатационные параметры автосамосвалов. Установлено, что на текущий момент не было сформулировано методик в полной и достаточной степени отражающих влияние факторов технологических трасс транспортирования, как наиболее одного из наиболее важных для автосамосвалов элементов систем разработки, на показатели и критерии надежности узлов карьерных автосамосвалов.

Современные системы удаленного мониторинга технического состояния узлов и агрегатов карьерных автосамосвалов обладают широким спектром снимаемых параметров автосамосвалов и, как следствие, имеют большой потенциал для их дальнейшего совершенствования. Существующий в настоящее время метод оценки негативного влияния технологических трасс транспортирования на надежность автосамосвала был построен лишь в

отношении его рамы, в то время как для подвески автосамосвала, узла с наибольшей частотой внезапных отказов и одним из наибольших средним временем простоя вследствие отказа, методик оценки фактического срока службы их подвесок обосновано не было.

Среди существующих в настоящий момент стратегий технического обслуживания и ремонта узлов карьерных автосамосвалов наиболее передовой является комбинация из обслуживания по регламенту и фактическому состоянию, включающая в себя оценку рисков отказа объекта. Ключевым вопросом при ее формировании становится установление рационального межремонтного периода узла. На сегодняшний день не сложилось единого подхода к его определению ввиду разного веса каждого из его критериев рационализации для каждого конкретного горного предприятия. Таким образом, возникает потребность в разработке алгоритма установления рационального межремонтного периода подвесок, основанной на учете их совокупного влияния, при обосновании регламента технического обслуживания и ремонта карьерных автосамосвалов, направленной на сокращение длительности логистических простоев при проведении аварийного ремонта этого узла.

В этой связи возникает цель исследования: обоснование периодичности регламентных ремонтных работ для подвесок карьерных автосамосвалов, эксплуатируемых в осложнённых горнотехнических условиях, для сокращения логистических простоев.

Для достижения поставленной в данной работе цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести комплексный анализ факторов, приводящих к сокращению срока службы подвесок карьерных автосамосвалов, задействованных 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.

ГЛАВА 2 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРАСС ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ НА СОКРАЩЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ПОДВЕСОК КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ

2.1 Анализ влияния осложненных горнотехнических условий эксплуатации на надежность узлов карьерных автосамосвалов на примере отдельных железорудных месторождений

Практика создания и применения большегрузных средств карьерного автомобильного транспорта свидетельствует о том, что основные конструктивные параметры автосамосвалов, выбор типа трансмиссии, подвесок и других агрегатов, и систем, а также основные технико-экономические показатели зависят от условий эксплуатации машин. Соответствие конструктивных параметров автосамосвалов эксплуатационным условиям влияет на критерии и показатели надежности узлов и агрегатов автомобилей [91].

Карьерные самосвалы осуществляют движение по технологическим трассам транспортирования. В ряде исследований отмечалось то, что большая часть всей длины маршрута, при неизменном горизонте ведения погрузочных работ и месте проведения разгрузки, в структуре каждого рейса совершается по одним и тем же участкам [77]. При описанной организации работ, единственной переменной в вопросе составления маршрутов транспортирования является место проведения погрузочных работ, что обусловлено подвиганием фронта ведения выемочных работ выемочной техникой.

Основным нормативным документом, регламентирующим конструирование и расчет нежестких дорожных одежд автомобильных дорог общей сети, к которым относят технологические трассы транспортирования карьерных автосамосвалов на предприятиях горной отрасли, является ОДН 218.046-01. Согласно этому документу, автомобильные дороги на карьерах включают в себя следующие структурные элементы (рисунок 2.1): земляное полотно, дорожная одежда, обочина, водоотливная канавка, предохранительный вал [15].

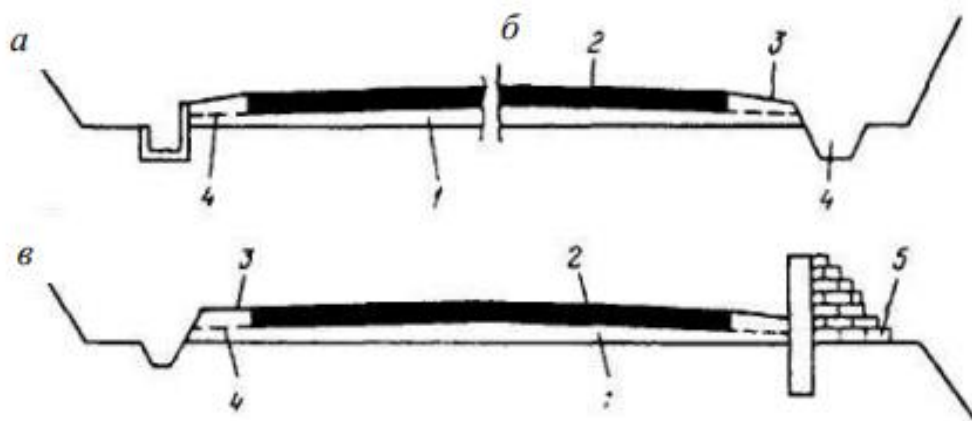


Рисунок 2.1 – Поперечное сечение технологической дороги в рыхлых (а), скальных (б) породах и на съездах (в): 1 – земляное полотно; 2 – дорожная одежда; 3 – обочина; 4 – водоотливная канавка; 5 – предохранительный вал [15]

Таким образом, для установления влияния горнотехнических условий, обусловленных факторами технологических трасс транспортирования горной массы, на срок службы подвесок карьерных автосамосвалов следует учитывать состояние их земляного полотна и дорожной одежды [10].

Как уже отмечалось выше, глубина ведения горных работ увеличивается на большинстве месторождений твердых полезных ископаемых, отработка которых ведется открытым способом, что приводит к осложнению горнотехнических условий, и, как следствие, снижению надежности узлов и агрегатов эксплуатируемых карьерных автосамосвалов. При этом ключевым узлом, подверженным внезапным отказам при описанных условиях эксплуатации, являются их подвески.

В научной литературе отмечалось, что наиболее тяжелые условия эксплуатации автосамосвалов наблюдаются на карьерах черной металлургии [35]. «Глубина карьеров здесь превышает в среднем 150 м, а в отдельных случаях достигает 230—275 м. Сравнительно невелика длина транспортирования руды и вскрыши, что обуславливает большое число погрузочно-разгрузочных циклов за рабочую смену, и, следовательно, интенсивную нагруженность узлов и базовых конструкции автосамосвалов» [35]. Среди последних следует выделить два предприятия, осуществляющие отработку железорудных месторождений

открытым способом – ОАО «Ковдорский ГОК» и АО «ЕВРАЗ Качканарский ГОК». Несмотря на их принадлежность к конкурирующим компаниям, на обоих в последние годы реализуются проекты по модернизации существующих технологических схем по добыче полезных ископаемых.

Так, на предприятии АО «ЕВРАЗ» Качканарском горно-обогатительном комбинате начата отработка при помощи нагорных карьеров залежей Собственно Качканарского месторождения (СКМ), расположенного в относительной близости от уже существующих карьеров, на которых производится отработка субгоризонтальных залежей соседнего Гусевгорского месторождения (ГГМ), на которых производится масштабное обновление парка техники для используемых экскаваторно-автосамосвальных комплексов с целью обеспечения проведения горных работ на более глубоких горизонтах. Реализация данного проекта привела к выявлению двух причин, обуславливающих осложнение горнотехнических условий эксплуатации карьерных автосамосвалов и приводящих к снижению надежности элементов подвесок [16]:

1. Давность ввода в эксплуатацию транспортных выработок;

До начала реализации проекта обеспечение грузопотока производилось загрузкой горной массы либо непосредственно в думпкары, пути для которых были проложены напрямую к фронту ведения добычных работ, либо в автосамосвалы БЕЛАЗ-7540 с грузоподъемностью 40т, которые уже в свою очередь производили разгрузку в вагоны железнодорожного транспорта. В настоящее же время повышение производительности новой выемочной техники повлекло за собой использование автосамосвалов со значительно большей грузоподъемностью: БЕЛАЗ-7530 грузоподъемностью 220т и БЕЛАЗ-7513 грузоподъемностью 130т. Очевидно, что автосамосвалы с большей грузоподъемностью обладают большими габаритными размерами (4,56 м против 7м и 8,4м соответственно). Но при этом, съезды некоторых из карьеров ГГМ – «Северном» и «Центральном» проектировались и строились с шириной, рассчитанной исходя из функционирования на них автосамосвалов со значительно меньшими габаритными размерами, чем те, которые стали

применяться в дальнейшем. Помимо очевидного снижения пропускной способности, это приводит к увеличению аварийной опасности, из-за чего снижаются радиусы поворотов (рисунок 2.2), то есть увеличивается крутизна на криволинейных участках, что приводит к неравномерности нагрузок только левой или правой пары подвесок, что может существенно снижать ресурс их элементов.



Рисунок 2.2 – Поворот технологической трассы малого радиуса на карьере
«Северный» Качканарского ГОКа [16]

2. Существенная разница между величинами продольных уклонов соседних участков технологической трассы транспортирования;

На многих месторождениях, где производится разработка крутопадающих рудных тел, характерна следующая ситуация: при начале ведения добычных работ отрабатываемое рудное тело обладает незначительным углом падения (в отдельных случаях – субгоризонтально). Однако, с течением времени при вскрытии новых горизонтов начинает производиться отработка крутопадающего бока рудного тела, обладающим значительным углом падения (рисунок 2.3.).

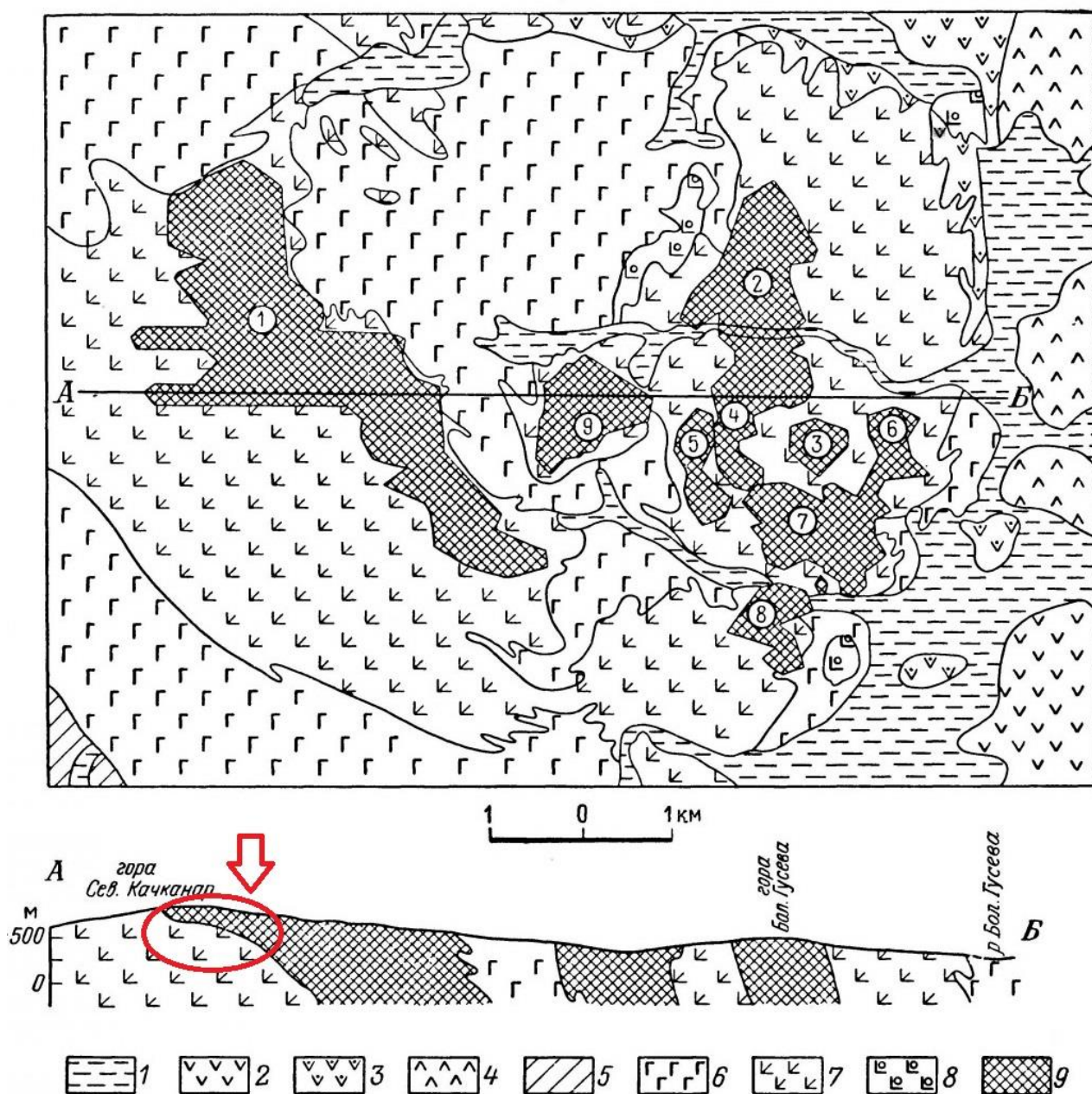


Рисунок 2.3 – Геологический разрез ГГУ и СКМ. Красным выделена область рудного тела, где происходит значительное увеличение угла падения [81]

Как видно из рисунка 2.3, описанная ситуация характерна для Собственно Качканарского месторождения, для карьеров Гусевогорского месторождения это применимо в значительно меньшей степени. Резкое увеличение угла падения рудного тела приводит к тому, что значительно увеличивается продольный уклон сначала вскрывающей выработки, а затем и формирующегося съезда соответствующего горизонта.

Таким образом, происходит как локальное значительное увеличение продольного уклона, так и рост руководящего уклона всей технологической трассы транспортирования горной массы.

В обоих случаях происходит снижение срока службы пар подвесок автосамосвалов: преимущественно на заднюю пару подвесок для карьеров, где движение транспортной техники в груженом состоянии происходит снизу вверх, а для карьеров, где грузопоток осуществляется сверху вниз (нагорного типа) – на переднюю. Последний характерен для нагорных карьеров Качканарского ГОКа, на которых производится отработка руд Собственно Качканарского месторождения.

Еще одним заслуживающим внимания проектом, иллюстрирующим осложнение горнотехнических условий эксплуатации горной техники, является доработка горизонтов рудного тела с -262м до -388м открытым способом карьера рудника «Железный» Ковдорского горно-обогатительного комбината в Мурманской области. При анализе данного проекта были выявлена еще одна причина, приводящая к снижению надежности элементов подвесок:

3. Неверный выбор материала для верхнего дорожного слоя технологических трасс транспортирования;

Борта и их уступы карьеры рудника «Железный» сложены крепкими скальными породами, с коэффициентом крепости от 6 до 12 по шкале Протодяконова, с незначительной трещиноватостью. Не смотря на то, что земляное полотно верхнего дорожного слоя такой технологической дороги крайне редко является неустойчивым, дорожная одежда участков подобных трасс транспортирования может находиться в неудовлетворительном состоянии (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Неудовлетворительное качество дорожного слоя участка технологической трассы транспортирования на Ковдорском ГОКе (фото автора)

Подобное является следствием одной из двух причин, а именно: нерациональный выбор материала для отсыпки дорожной одежды (в рассматриваемом примере – измельченные вскрышные породы, не прошедшие предварительное разделение по крупности фракций) или же недостаточно частое проведение планировочных работ бульдозерами или автогрейдерами. При описанной ситуации значительно увеличивается трение качения КГШ и колес автосамосвалов, что приводит к появлению хаотичных внешних нагрузок на их подвески, и, как следствие, сокращению их ресурса.

2.2 Обоснование выбора инструментов для оценки негативного влияния горнотехнических условий эксплуатации на срок службы подвесок карьерных автосамосвалов

Как утверждалось выше, а научной литературе утверждалось, основными узлами, подверженными негативному влиянию осложненных горнотехнических условий эксплуатации являются подвески карьерных автосамосвалов, что выражается в наибольшем среди всех узлов и агрегатов числе отказов, а одним из наибольших суммарных значений ремонта вследствие произошедшего отказа. Согласно анализу статистики ремонтно-механических служб рассматриваемых

предприятий, на обоих ГОКах удельный вес числа отказов подвесок карьерных автосамосвалов (рисунок 2.5) и суммарной продолжительностью ремонта (рисунок 2.6) схож с описанным в литературе.



Рисунок 2.5 – Узлы и агрегаты карьерных автосамосвалов, участвующих в исследовании, с наибольшим числом отказов на: а) АО «Ковдорский ГОК», б) «ЕВРАЗ Качканарский ГОК» (составлено автором)

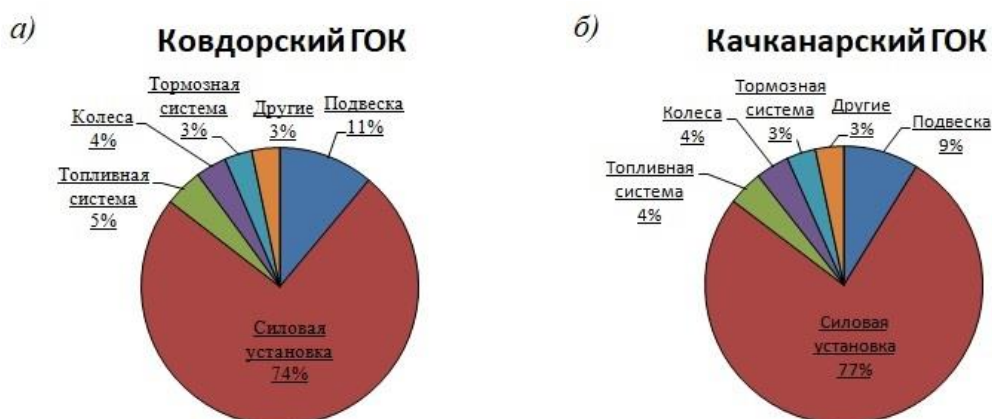


Рисунок 2.6 – Узлы и агрегаты карьерных автосамосвалов, участвующих в исследовании, с наибольшей суммарной продолжительностью ремонта на: а) АО «Ковдорский ГОК», б) «ЕВРАЗ Качканарский ГОК» (составлено автором)

С целью выбора инструментов для оценки их влияния на сокращение срока службы рассматриваемого узла, следует рассмотреть конструкцию последних на примере автосамосвалов производства компании БЕЛАЗ, подвеска автосамосвала состоит из двух частей: передней и задней, которые позволяют уменьшить

действующие на раму возникающие статические и динамические нагрузки, а также снижать амплитуду образующихся при движении вибраций. Передняя подвеска (рисунок 2.7) состоит из двух пневмогидравлических цилиндров, проушины с шарниром, рычага передней оси и поперечной штанги. Нагрузки, действующие на колеса передней оси, передаются на раму через цилиндры подвески, поперечную штангу и проушину с шарниром. Непосредственно сами цилиндры подвески воспринимают только вертикальные нагрузки, штанга – поперечные, а центральный шарнир, закрепленный на верхнем конце цилиндра, – вертикальные, поперечные и продольные [56].

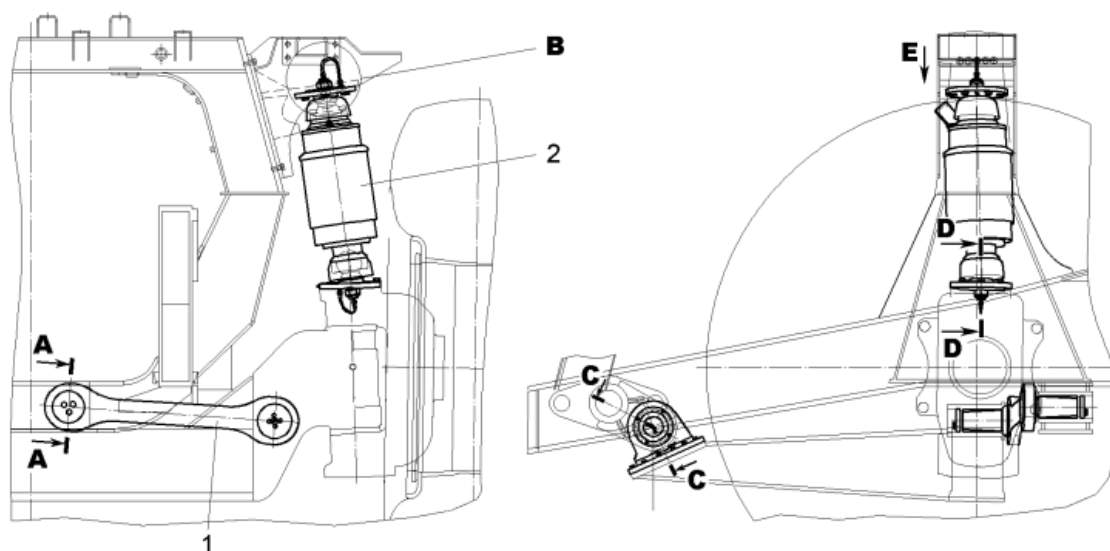


Рисунок 2.7 – Передняя подвеска автосамосвала БЕЛАЗ-7513. 1 – штанга; 2 – пневмогидравлический цилиндр [56]

Задняя подвеска (рисунок 2.8) состоит из двух пневмогидравлических цилиндров, поперечной штанги подвески, рычага заднего моста и проушины с центральным шарниром. Нагрузки, действующие на колеса заднего моста, передаются на раму через цилиндры подвески, поперечную штангу и центральный шарнир. Цилиндры подвески воспринимают только вертикальные нагрузки, штанга – поперечные, а центральный шарнир – вертикальные, поперечные и продольные [56].

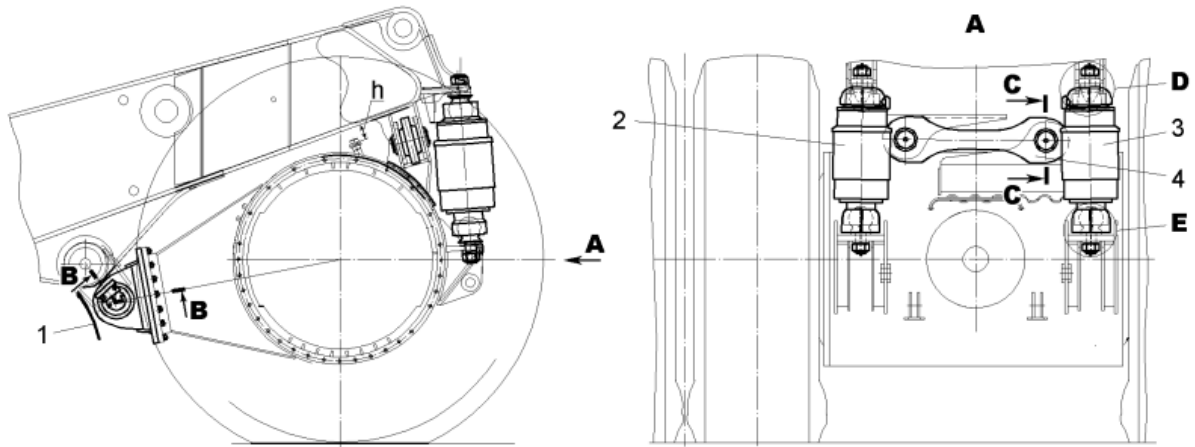


Рисунок 2.8 – Задняя подвеска автосамосвала БЕЛАЗ-7513. 1 – штанга; 2, 3 – пневмогидравлический цилиндр; 4 – штанга подвески [56]

Цилиндр подвески представляет собой пневматическую рессору поршневого типа в комбинации с гидравлическим амортизатором. Рабочим элементом в цилиндре является технический газообразный азот. Передние и задние цилиндры подвески аналогичны по конструкции, включают в себя шток, сочлененный с шаровой опорой и хвостовиком, и отличаются лишь размерами деталей, конфигурацией паза на штоке амортизатора, количеством заправляемого масла и величиной давления газа [56].

Согласно рекомендациям завода-изготовителя, на основе которых горнодобывающие предприятия создают регламент ТОиР, плановый ремонт подвесок должен производиться каждые 2000 часов [56]. При этом срок службы рассматриваемого узла принимается равным 10000 часов.

В настоящее время все модели карьерных автосамосвалов, закупаемых для нужд горнодобывающих предприятий РФ, оборудуются различными системами удаленного мониторинга отдельных параметров, характеризующих тот или иной аспект технического состояния машины во время ее непосредственной эксплуатации. Так, например, все выпускаемые в настоящий момент карьерные автосамосвалы производства ОАО «БЕЛАЗ» комплектуются системой мониторинга давления во всех четырех пневмогидроцилиндрах подвески (рисунок 2.9).



Рисунок 2.9 – Крепление датчика давления системы СКЗиТ к цилиндру задней подвески (фото автора)

Она состоит из смонтированных и интегрированных в единый комплекс регистраторов давления рабочего тела в полостях пневмогидравлических цилиндрах подвески, и призвана в первую очередь замерять вес загруженной в кузов горной массы, а также оценивать ее распределение по площади кузова, тем самым производить комплексный контроль соблюдения паспорта ведения погрузочных работ.

Помимо функции непосредственного контроля загрузки кузова, эта система также может быть использована для оценки факторов технологических трасс транспортирования горной массы, обусловленных осложненными горнотехническими условиями, оказывающих негативное влияние на надежность подвесок карьерных автосамосвалов, что становится возможным благодаря измерению величины давления рабочего тела в полостях пневмогидравлических цилиндров подвески. Благодаря имплементации подсистемы регистрации давления в пневматических гидроцилиндрах подвески в АСУ ГТК, полученные значения фиксируются на экране оперативной информации о текущем состоянии автосамосвала (рисунок 2.10), а также записываются и в дальнейшем хранятся в

базе данных ПО совместно с временем регистрации, местоположением автосамосвала и другими эксплуатационными показателями, снятыми системой.

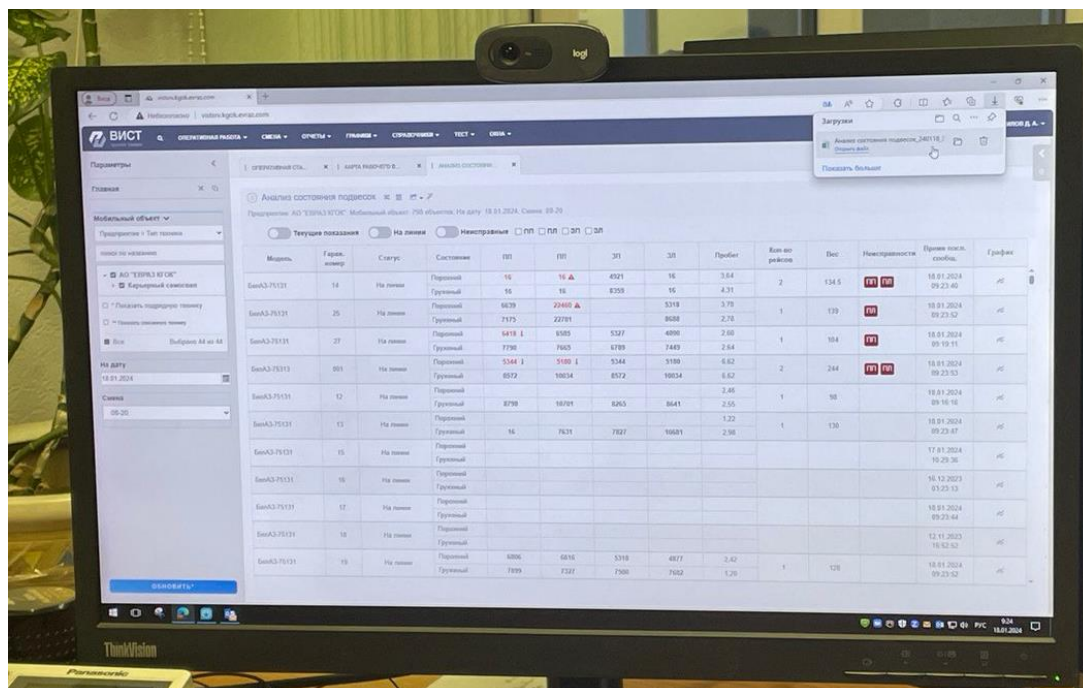


Рисунок 2.10 – Экран оперативного мониторинга давления в подвесках автосамосвала (фото автора)

Таким образом, посредством учета и анализа этих значений становится возможным оценить отдельные факторы технологических трасс транспортирования горной массы как в оперативном виде, что позволяет оперативно принимать решения о проведении мероприятий по улучшению состояния трасс транспортирования, так и создавать базы данных с зарегистрированными значениями, анализ которых позволит произвести оценку их влияния на надежность подвесок карьерных автосамосвалов.

С целью количественной оценки выбранного параметра надежности предлагается обратиться к журналам механиков служб ремонтно-механических цехов (РМЦ) горных предприятий, среди которых наибольший интерес представляют отчеты о месячном значении КТИ парка карьерных автосамосвалов. В них инженерно-техническими работниками вносится информация о времени нахождения в исправном состоянии по каждому дню в течение месяца (рисунок 2.11),

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
кол-во а/с	16											
Б-75139	244	24	24	24	24	24	24	24	24	24	22,2	0
Б-75139	246	14	0	18	12	12	24	21,4	24	16,7	24	0
Б-75139	247	14	16,04	24	24	24	24	24	11,5	0	12	8
Б-75139	248	24	22,5	22,2	22,9	22,1	24	10,5	15,8	20	21	24
Б-75139	249	24	24	20	10,5	24	20	16,3	12	24	17,1	0
итого		280,9	282	320	285	276	323	299	288	277	305	219
кол-во а/с	5											
Б-75307	101	24	17,52	24	22	20,9	8	24	20,8	16	24	23,3
Б-75307	102	24	24	24	24	20,8	15	22	24	24	24	22
Б-75307	103	12	17,42	24	12,8	22	16	20	3,33	12	16,9	0
Б-75307	104	24	24	22,4	13,2	24	24	24	24	24	24	0,67
Б-75307	105	24	24	22,3	24	24	24	13,5	24	24	24	24

Рисунок 2.11 – Фрагмент отчета о месячном значении КТИ. Продолжительность нахождения в исправном состоянии автосамосвалов по суткам (составлено автором)

Помимо этого, в отчетах фиксируются все виды простоев и их продолжительность по каждой единице техники за месяц (рисунок 2.12) по следующим пунктам:

- суммарное время нахождения в исправном состоянии за месяц, мч;
- продолжительность проведения ремонтных работ (непосредственно ремонтных работ и внеплановых простоев), ч;
- продолжительность проведения технического обслуживания, ч;
- продолжительность проведения планово-предупредительных ремонтов, ч;
- продолжительность подготовительных операций (мойка и эвакуация неисправной машины из карьера в РМЦ), ч;
- продолжительность ожидания ремонтных работ (отсутствие персонала, ожидание подрядной организации, ожидание ремонтного места, ожидание мойки, отсутствие тягача, ожидание запасных частей, отсутствие инструмента, ожидание автокрана и отсутствие водителя), ч;
- КТИ за отчетный период.

Марка а/м	Гар. №	Всего дней пребывания в х-ве	Время исп. сост.	Время тех. готовности	ТР в т.ч.	Пл. ТР	Выполняемый простой	ТО	ППР	Подготовка операции в т.ч.	мойка	эвакуация с карьера	Ожид.рем. В т.ч.	отсутствие персонала	ожидаемое подорожной логистикой	ожидаемое ремонтного места	ожидаемое мойки	отсутствие тягача	ожидаемое запасных частей	отсутствие инструмента	ожидаемое автобрана	отсутствие водителя	КТИ %
кол-во а/с	16																						
кол-во а/с	5																						
Б-75307	101	744	552,2	569,2	102,05	0	102,05	20	0	14,25	14,25	0	55,5	24	0	0	0	2,5	12	0	0	17	74,2%
Б-75307	102	744	687,52	687,52	34,98	0	34,98	13	0	5,5	2	3,5	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0	92,4%
Б-75307	103	744	488,66	499,66	144,67	0	144,67	20	0	10,92	10,92	0	79,75	49,08	0	0	0	8,87	0	11	0	11	65,7%
Б-75307	104	744	570,64	592,64	100,09	0	100,09	16,52	0	5,75	2,33	3,42	51	24	0	0	0	0	5	0	0	22	76,7%
Б-75307	105	744	689,59	689,59	24,41	0	24,41	28	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	92,7%
Итого		3720	2988,61	3038,61	406,2	0	406,2	95,52	0	40,42	33,5	6,92	189,25	97,08	0	3	0	11,17	17	11	0	50	80,3%
Б-75313	106	744	563,17	563,17	121	0	121	12	0	18,18	8,83	11,33	29,87	12	17,87	0	0	0	0	0	0	0	75,7%
Б-75313	107	744	572,75	572,75	102,67	0	102,67	8	0	8,58	8,58	0	54	12	23	3	0	16	0	0	0	0	77,0%
Б-75313	108	744	561,16	584,16	138,58	0	138,58	11	0	8,59	8,78	1,83	24,87	0	1,67	0	0	0	0	0	0	23	75,4%
Б-75313	109	744	676,91	682,39	37,09	0	37,09	20,52	0	4	4	0	5,48	0	0	0	0	0	0	0	0	5,48	91,0%
Б-75313	110	744	634,31	634,31	59,19	0	59,19	8	0	15,83	15,83	0	28,87	13,67	0	0	0	0	15	0	0	0	85,3%
Б-75313	111	744	555,08	576,08	136,09	0,87	135,42	13	0	3,33	3,33	0	38,5	0	0	12,5	0	3	0	0	0	21	74,6%
Б-75313	112	744	528,84	548,84	109,41	0	109,41	11	0	14,75	4	10,75	80	12	0	24	0	0	0	0	24	20	71,1%
Итого		5208	4092,22	4161,7	704,03	0,67	703,36	79,52	0	73,24	49,33	23,91	258,99	49,67	42,34	39,5	0	3	31	0	24	69,48	78,6%

Рисунок 2.12 – Фрагмент отчета о месячном значении КТИ. Информация о простоях за отчетный период (составлено автором)

Помимо этого, в этом отчете можно посмотреть дату, время начала и конца простоя, а также его вид (рисунок 2.13). Выполнявший работой слесарь оставляет комментарий к выполненному виду работ.

1	Наименование оборудования	Технологический номер оборудования	Тип события	Описание события	Начало события, дата, час., мин.	Окончание события, дата, час., мин.	Время простоя, ч	Время в ремонте, ч
26	Б-75307	101		Мойка	10.07.21 02:30:00	10.07.21 03:59:59	1,50	4,00
27	Б-75307	101		заменяли з.л. цилиндр	10.07.21 04:00:00	10.07.21 08:00:00	4,00	4,00
28	Б-75307	101		Ожидание мойки	14.07.21 07:10:00	14.07.21 08:00:00	0,83	
29	Б-75307	101		помыли на ремонт	14.07.21 08:00:00	14.07.21 08:59:59	1,00	10,00
30	Б-75307	101		Отсутствие тягача	14.07.21 09:00:00	14.07.21 10:59:59	2,00	10,00
31	Б-75307	101		заменяли правые задние балло	14.07.21 11:00:00	14.07.21 19:59:59	9,00	10,00
32	Б-75307	101	Плановое ТО	ТО-1	14.07.21 20:00:00	15.07.21 01:59:59	6,00	12,00
33	Б-75307	101	Плановое ТО	Обтянули пр.зн.б-ны.	15.07.21 02:00:00	15.07.21 08:00:00	6,00	12,00
34	Б-75307	101		перекрепили переднюю реакт	15.07.21 08:00:00	15.07.21 08:59:59	1,00	1,00
35	Б-75307	101		Отсутствие водителя на ремонт	15.07.21 09:00:00	15.07.21 19:59:59	11,00	1,00
36	Б-75307	101		Тянул колеса	15.07.21 20:35:00	15.07.21 22:40:00	2,08	2,08
37	Б-75307	101		Мойка	16.07.21 18:50:00	16.07.21 20:00:00	1,17	
38	Б-75307	101		Демонтаж ЗП подвески	16.07.21 20:00:00	17.07.21 03:59:59	8,00	8,00
39	Б-75307	101		Ожидание запасных частей	17.07.21 04:00:00	17.07.21 08:00:00	4,00	8,00

Рисунок 2.13 – Фрагмент отчета о месячном значении КТИ. Конкретизированная информация о простоях за отчетный период (составлено автором)

В случае потери работоспособности автосамосвала фиксируется информация об отказавшем узле, наработка машины с начала эксплуатации на момент отказа, наработка до отказа узла и т.д. (рисунок 2.14).

Эффект события	Отказавший элемент оборудования	Наработка оборудования (Наработка в М/ч)	Наработка на отказ узла (М/ч)
Остановка самосвала		37596	
Остановка самосвала		37596	
Остановка самосвала		37596	
Остановка самосвала		37596	
Остановка самосвала		37596	
Остановка самосвала	Шина (замена)	37596	4032
Остановка самосвала		37596	
Остановка самосвала	Задняя подвеска	37596	2070
Остановка самосвала	Шина (замена)	37596	
Остановка самосвала		37598	
Остановка самосвала	Шина (замена)	37610	
Остановка самосвала	Шина (замена)	37610	
Остановка самосвала	Электрооборудование	37612	8531

Рисунок 2.14 – Фрагмент отчета о месячном значении КТИ. Информация о наработке автосамосвала и отказавшего узла (составлено автором)

2.3 Установление группы параметров технологических трасс транспортирования, обусловленных осложненными горнотехническими условиями

В качестве выходного параметра, оценивающего негативное влияние параметров трасс транспортирования, обусловленных осложненными горнотехническими условиями, предлагается выбрать сокращение срока службы подвесок карьерных автосамосвалов ΔT , ч., как отношение номинального $T_{\text{ном}}$, ч. и фактического срока службы этого узла $T_{\text{ф}}$, ч..

Среди основных факторов, приводящих к увеличению предлагаемого показателя следует отметить следующие:

– *Режимы работы автосамосвалов.* При нерациональных скоростях движения, ускорения, торможения и т.п. может происходить возникновение дополнительных нагрузок на узлы автосамосвала, требующих компенсации пневматическими гидроцилиндрами подвески, тем самым приводя к их изнашиванию, что сокращает срок службы этого узла [44]. Модули контроля движения автосамосвалов, имплементированные во все используемые в настоящее время на карьерах горнодобывающих предприятий РФ [52], позволяют

нивелировать негативное влияние этого фактора за счет предупреждения оператора, горного мастера, диспетчера и начальника смены о необходимости изменения режимов работы или в отдельных случаях при помощи оперативного вмешательства в управление машиной в автоматическом режиме [53].

– *Природно-климатические условия.* Ввиду того, что пневмогидравлическая смесь, служащая рабочим телом в цилиндрах подвески, подчиняется законам термодинамики, т.е. создаваемое ей давление при неизменном объеме напрямую зависит от температуры, то при низких температурах окружающей среды (что характерно для многих месторождений полезных ископаемых РФ, отрабатываемых открытым способом) создаваемое в полостях давление может быть недостаточным для компенсации возникающих при эксплуатации внешних нагрузок [35]. Поэтому, при обосновании методики по оценке и контролю горнотехнических условий эксплуатации автосамосвалов при помощи регистрации давления в полостях пневмогидравлических цилиндрах подвески следует также учитывать и климатические условия эксплуатации.

– *Квалификация оператора.* Для обеспечения грузопотока карьерными автосамосвалами обязательно требуются оператор. Несмотря на многочисленные исследования в направлении развития беспилотной техники, к настоящему времени на территории РФ не было создано ни одного предприятия, где бы функционировали только роботизированные самосвалы [33, 87]. Ввиду того, что оператором машины могут не всегда приниматься рациональные решения по управлению техникой, могут возникать дополнительные внешние нагрузки [107], требующие их компенсации подвеской, что приводит сокращению срока ее службы.

– *Вес перевозимой горной массы и его распределение по площади кузова.* Одной из ключевых технических характеристик карьерного автосамосвала является его номинальная грузоподъемность [43]. При этом завод-изготовитель машин выпускает рекомендации для предприятий-эксплуатантов, регламентирующие размещение горной массы в кузове (точки погрузки в зависимости от физико-механических характеристик груза) и стратегии по

контролю веса груза в кузове. Нарушение любой из рекомендаций влечет за собой дополнительные нагрузки на соответствующую подвеску [25], формируя «шапку» насыпного груза нерациональной геометрии, что приводит к сверхнормативной нагрузке на подвески и, как следствие, сокращая их срок службы.

– *Срок эксплуатации машины.* По мере эксплуатации карьерного автосамосвала неизбежно возникают внезапные отказы его узлов и агрегатов. Перед непосредственным отказом в узле зачастую начинают возникать силы, приводящие к нерациональному режиму его работы, что может приводить к возникновению дополнительных нагрузок на элементы подвески, тем самым сокращая их срок службы [39]. Установлено, что по мере увеличения возраста машины число внезапных отказов его узлов возрастает [19]. Следовательно, при обосновании методики по оценке и контролю горнотехнических условий эксплуатации автосамосвалов при помощи регистрации давления в полостях пневмогидравлических цилиндрах подвески следует также учитывать возраст машины.

– *Группа параметров технологической трассы транспортирования.* Следует рассмотреть их подробнее:

I. Геометрия участков трассы транспортирования.

Негативное влияние рассматриваемого фактора на сокращение срока службы узлов карьерных автосамосвалов отмечалось многими авторами [38, 43, 117]. К данной категории можно отнести такие параметры трассы транспортирования, которые повлияют на отображение плана трассы в горизонтальной плоскости. Среди таковых можно выделить следующие три подфактора:

– *Средневзвешенный продольный уклон трассы $i_{\text{ср.в.прод.}}$, ‰, определяемый исходя из выражения (2.1):*

$$i_{\text{ср.в.прод.}} = \frac{\sum_{k=1}^n i_{k \text{ прод.}} l_k}{\sum_{k=1}^n l_k}, \quad (2.1)$$

где $i_{k \text{ прод.}}$ – продольный уклон k -ого участка, ‰;

l_k – длина участка, м;

n – количество участков трассы.

Чем больший продольный уклон на отдельных участках технологической трассы, тем большему изнашиванию подвержены подвески на задней оси при подъеме и передней при спуске на карьерах нагорного типа. Его можно оценить посредством учета средневзвешенного продольного уклона, как отношения удельного веса уклонов отдельных участков к общей длине трассы. При этом, посредством регистрации величины давления в каждом из четырех пневмогидроцилиндров (переднем и заднем правом и левом), продольный уклон становится возможно оценить как разницу между средним давлением в передней и задней паре пневмогидроцилиндров, то есть согласно выражению (2.2).

$$i_{\text{ср.в.прод.}} = \frac{\sum_{k=1}^n \left(\frac{|P_{\text{ПП}k} - P_{\text{ПЛ}k}|}{2} - \frac{|P_{\text{ЗП}k} - P_{\text{ЗЛ}k}|}{2} \right) K l_k}{\sum_{k=1}^n l_k}, \quad (2.2)$$

где $P_{\text{ПП}k}$ – давление в переднем правом пневмогидроцилиндре подвески на k -том участке, МПа;

$P_{\text{ПЛ}k}$ – давление в переднем левом пневмогидроцилиндре подвески на k -том участке, МПа;

$P_{\text{ЗП}k}$ – давление в заднем правом пневмогидроцилиндре подвески на k -том участке, МПа;

$P_{\text{ЗЛ}k}$ – давление в заднем левом пневмогидроцилиндре подвески на k -том участке, МПа;

K – переводной коэффициент из МПа в м.

Для удобства записи примем среднее значение давления в передних пневмогидроцилиндрах подвески за $P_{\text{Пер ср}}$, среднее значение давления в задних – $P_{\text{З ср}}$. Аналогично для среднее значение давления между передней и задней левой $P_{\text{Л ср}}$, а между передней и задней правой – $P_{\text{П ср}}$. Таким образом, выражение (2.2) примет вид выражения (2.3):

$$i_{\text{ср.в.прод.}} = \frac{\sum_{k=1}^n (P_{\text{Пер ср}k} - P_{\text{З ср}k}) K l_k}{\sum_{k=1}^n l_k} \quad (2.3)$$

– *Средневзвешенный поперечный уклон трассы $i_{\text{ср.в.попер.}}$, ‰, определяемый согласно выражению (2.4):*

$$i_{\text{ср.в.попер.}} = \frac{\sum_{k=1}^n i_{k \text{ попер.}} l_k}{\sum_{k=1}^n l_k}, \quad (2.4)$$

где $i_{k \text{ попер.}}$ – поперечный уклон участка, ‰;

l_k – длина участка, м;

n – количество участков трассы.

Для оценки рассматриваемого подфактора следует использовать разницу между средними значениями давления в пневмоцилиндрах правой и левой пары подвесок, определяемую согласно выражению (2.5):

$$i_{\text{ср.в.попер.}} = \frac{\sum_{k=1}^n \left(\frac{|P_{\text{ПП}k} - P_{\text{ЗП}k}|}{2} - \frac{|P_{\text{ПЛ}k} - P_{\text{ЗЛ}k}|}{2} \right) K l_k}{\sum_{k=1}^n l_k} = \frac{\sum_{k=1}^n (P_{\text{Пр ср}} - P_{\text{Л ср}}) K l_k}{\sum_{k=1}^n l_k} \quad (2.5)$$

При больших значениях поперечного уклона нагрузки на левую или правую пару подвесок воздействие внешних сил будет значительно выше, чем на другую, что приведет к снижению срока службы пневмоцилиндров первой.

– *Средневзвешенная криволинейность трассы $R_{\text{п.тр.}}$. Частое изменение направления движения, равно как и приложение нагрузок с преимущественно одной стороны, негативно влияет на срок службы пневмоцилиндров соответствующей части подвески [111, 117]. Его можно оценить как отношение совокупной кривизны участков с поворотами трассы к ее протяженности. В данном случае предлагается устанавливать кривизну как отношение протяженности криволинейного участка S_m к кратчайшему расстоянию T_m между начальной и конечной точками участка.*

Для определения каждой из величин следует прибегнуть к модулю оперативного управления АСУ ГТК, который позволяет установить текущее местоположение машины. Таким образом, при пересечении узловых точек маршрута согласно траектории движения автосамосвала производится измерение протяженности S_m криволинейного участка m , при этом величина кратчайшего расстояния между начальной и конечной точками участка T_m остается

неизменной до тех пор, пока маршейдерская служба ГОКа не изменит его местоположение. Следовательно, для оценки средневзвешенной величины криволинейности трассы получим выражение (2.6):

$$R_{\text{п.тр.}} = \frac{\sum_{k=1}^m \frac{S_m}{T_m} l_{\text{п.к}}}{\sum_{k=1}^n l_k}, \quad (2.6)$$

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.

Для оценки совокупного влияния рассматриваемого фактора $C_{\text{геом}}$ следует просуммировать величины его подфакторов, согласно выражению (2.7):

$$C_{\text{геом}} = i_{\text{ср.в.прод.}} + i_{\text{ср.в.попер.}} + R_{\text{п.тр.}} \quad (2.7)$$

II. Сочетания соседних участков между собой.

Помимо геометрии отдельных участков трассы транспортирования, немаловажную роль в развитии деградиционных процессов ходовой части автосамосвалов занимает сочетания участков трассы $C_{\text{соч}}$, что приводит к сокращению срока службы подвесок автосамосвала [91, 95]. Их влияние можно оценить согласно выражению (2.8):

$$C_{\text{соч}} = \frac{\sum_{k=1}^n |i_{\text{прод. } k} l_k - i_{\text{прод. } k-1} l_{k-1}|}{\sum_{k=1}^n l_k}, \quad (2.8)$$

где i_k – продольный уклон участка трассы, ‰;

$i_{\text{прод. } k-1}$ – продольный уклон предыдущего участка, ‰;

l_{k-1} – длина предыдущего участка, м.

Выражение (2.8) может быть преобразовано образом в выражение (2.9) при помощи учета величины давления в пневмогидроцилиндрах

$$C_{\text{соч}} = \frac{\sum_{k=1}^n |(P_{\text{Пер ср } k} - P_{\text{З ср } k}) l_k - (P_{\text{Пер ср } k-1} - P_{\text{З ср } k-1}) l_{k-1}|}{\sum_{k=1}^n l_k} \quad (2.9)$$

III. Макропрофиль участков трассы.

В рамках анализа технологических трасс транспортирования среди наиболее распространенных проблем качества дорожного слоя можно выделить

различные отклонения от установленного поперечного профиля участков технологических дорог, чаще всего ими являются возвышения и ямы, т.е. макропрофиль участков трассы [29, 116, 117].

Основными параметрами отклонений от установленного продольного профиля являются их глубина и протяженность, поэтому с целью оценки макропрофиля участков трассы на всем протяжении технологической трассы транспортирования, как средневзвешенной глубины отклонений на всем маршруте, можно использовать выражение (2.10):

$$C_{\text{кач}} = \frac{\sum_{k=1}^n h_k \cdot l_{\text{откл.}k}}{\sum_{k=1}^n l_k}, \quad (2.10)$$

где h_k – глубина отклонения, м;

$l_{\text{откл.}k}$ – протяженность отклонения, м.

Отклонения от установленного поперечного профиля можно оценить посредством использования систем удаленного мониторинга технического состояния, устанавливаемых на различные узлы и агрегаты карьерных автосамосвалов. В частности, одним из мониторируемых параметров, которые позволяют производить необходимую оценку, является величина давления в каждом из четырех пневмогидроцилиндров подвески. Отклонение от установленного профиля участка трассы может быть обнаружено посредством анализа «флуктуаций» давления, краткосрочного (менее 3с) и скачкообразного (более 25%) изменения величины давления, на графике изменения давления на протяжении всего маршрута. Следовательно, глубина отклонений может быть выражена в виде разницы между пиковым (зарегистрированным во время «флуктуаций») и средним давлением на участке, а их протяженность – как произведение длительности «флуктуации» на скорость движения на этом участке согласно вырежению (2.11).

$$C_{\text{кач}} = \frac{\sum_{k=1}^n \left| \frac{P_{\text{ПЛпик.}} + P_{\text{ППпик.}}}{2} - \frac{P_{\text{ПЛср.}} + P_{\text{ППср.}}}{2} \right| K t_{\text{пик.}v}}{\sum_{k=1}^n l_k}, \quad (2.11)$$

где $P_{\text{ПЛпик.}}$ и $P_{\text{ППпик.}}$ – величина пикового давления в переднем левом и правом пневмогидроцилиндрах подвески, МПа;

$P_{\text{Плср.}}$ и $P_{\text{ПП ср.}}$ – величина среднего давления на участке в переднем левом и правом пневмогидроцилиндрах подвески, МПа;

$t_{\text{пик.}}$ – длительность «флуктуации» давления, с;

v – средняя скорость движения автосамосвала на участке, м/с.

Влияние группы параметров технологической трассы транспортирования на сокращение срока службы подвески предлагается оценивать как сумму всех ее факторов, описанных выше.

2.4 Связь параметров технологических трасс транспортирования с системами разработки месторождений открытым способом

В настоящее не было сформировано единой универсальной классификации систем разработки месторождений твердых полезных ископаемых открытым способом, так как «ни одна классификация не может ухватить многообразия условий залегания месторождений, возможных конфигураций фронта и направлений его перемещения» [74]. Таким образом, существующие подходы к классификации систем разработки разделяют на два типа, согласно двум классификационным признакам, а именно:

1. Согласно направлению подвигания фронта выемочных работ и их конфигурации.
2. Согласно способу отвалообразования и механизации выемочных и транспортных операций.

В рамках первого подхода наибольшую известность приобрели классификации В.В. Ржевского (основана на характере расположения и перемещения фронта работ) [70], А.И. Арсентьева (основана на характере перемещения фронта работ и отвалообразования, виде уступов и состоянии забоя) [11].

Для второго же таковые разрабатывались Н.В. Мельниковым, Е.Ф. Шешко и другими (включают в себя характер отвалообразования, условия применения систем разработки, а также типовые виды забойного и транспортного оборудования) [43, 62].

Ввиду того, что технологическая трасса транспортирования горной массы карьерными автосамосвала в рамках аспекта технологии ведения горных работ претерпевает изменения лишь связанные с перемещением фронта погрузочных работ, то в рамках дальнейших исследований следует опираться на классификацию систем разработки, учитывающих именно этот фактор, следовательно, принимается классификация В.В. Ржевского (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Классификация сплошных систем разработки месторождений полезных ископаемых по В.В. Ржевскому [70]

Группа систем	Подгруппа	Система разработки
Сплошные (С)	Сплошные продольные (СД)	Сплошная продольная однобортная (СДО)
		Сплошная продольная двухбортная (СДД)
	Сплошные поперечные (СП))	Сплошная поперечная однобортная (СПО)
		Сплошная поперечная двухбортная (СПД)
	Сплошные веерные (СВ)	Сплошная веерная центральная (СВЦ)
		Сплошная веерная рассредоточенная (СВР)
	Сплошные кольцевые (СК)	Сплошная кольцевая центральная (СКЦ)
		Сплошная кольцевая периферийная (СКП)
Углубочные (У)	Углубочные продольные (УД)	Углубочная продольная однобортная (УДО)
		Углубочная продольная двухбортная (УДД)
	Углубочные поперечные (УП))	Углубочная поперечная однобортная (УПО)
		Углубочная поперечная двухбортная (УПД)
	Углубочные веерные (УВ)	Углубочная веерная рассредоточенная (УВР)
	Углубочные кольцевые (УК)	Углубочная кольцевая (УКЦ)
Смешанные (УС)	Различные сочетания систем разработки выше	

Согласно ней, учитывается направление развития горных работ, а именно:

1. Если оно происходит в горизонтальном направлении без увеличения глубины, то группу таких систем разработки называют сплошными (характерна для горизонтальных и пологих месторождений полезных ископаемых, чаще всего строительных материалов и угля);

2. Если оно происходит не только в горизонтальном направлении, но и по мере подготовки новых горизонтов, происходит углубление, то такие группы таких систем разработки называют углубочными (характерна для большинства месторождений полезных ископаемых, особенно для рудных) [70].

Помимо этого, перемещение фронта ведения работ делится на полгруппы согласно направлению относительно:

- параллельно короткой или длинной оси карьерного поля при двубортовой или одnobортовой выемке;
- центра выемочного слоя веерообразно (центрально или рассредоточено), радиально от центра к границам или от периферии к центру.

Так как при расчете каждого из факторов технологических трасс транспортирования горной массы, обуславливающих осложненные горнотехнические условия эксплуатации карьерных автосамосвалов, согласно предлагаемой методике, увеличение суммарной протяженности участков трассы приводит к снижению каждого из них, то, следовательно, для сплошных систем разработки осложнение рассматриваемого типа не характерно. Таким образом, при дальнейшем выявлении связи между предлагаемой методикой с системами разработки месторождений открытым способом следует рассматривать только углубочные системы разработки, в виду того что для смешанных системы разработки будут характерны те же факторы, что и для сочетаемых со сплошными углубочными.

Рассматривая совокупность факторов технологических трасс транспортирования горной массы, обуславливающих осложненные горнотехнические условия эксплуатации карьерных автосамосвалов с целью установления связи между ними и системами разработки, следует отметить, что макропрофиль участков трассы зависит в первую очередь от организационно-технических мероприятий служб ГОКа, в обязанности которых входит поддержание технологических трасс на приемлемом для эффективной эксплуатации автосамосвалов уровне. Следовательно, для дальнейшего анализа не следует учитывать эту категорию.

Таким образом, по мере отработки месторождения:

- для углубочных продольных характерно увеличение поперечного уклона участков трассы, вызванном подвиганием фронта ведения работ параллельно короткой оси карьерного поля. При этом, рост числа криволинейных участков, которыми чаще всего являются съезды, в общей структуре трассы не характерен, равно как резкое изменение геометрии между соседними участками и рост средневзвешенного поперечного уклона трассы;
- для углубочных поперечных характерно увеличение продольного уклона участков трассы, вызванном подвиганием фронта ведения работ параллельно длинной оси карьерного поля. Рост числа криволинейных участков, которыми чаще всего являются съезды, в общей структуре трассы не характерен, равно как резкое изменение геометрии между соседними участками и рост средневзвешенного поперечного уклона трассы;
- для углубочной веерной сплошной системы разработки не будет наблюдаться только значительный рост продольного уклона на наклонных участках трассы в виду рассредоточенного направления подвигания фронта работ;
- для углубочной кольцевой системы разработки будут характерны все геометрические факторы технологических трасс транспортирования.

Резюмируя, следует отметить, что для достижения задачи по установлению зависимости между группой параметров технологических трасс транспортирования, приводящие к осложнению горнотехнических условий эксплуатации карьерных автосамосвалов, и сокращением срока службы подвесок карьерных автосамосвалов согласно предлагаемой методике в первую очередь следует рассматривать наиболее месторождения с трассами транспортирования с наиболее выраженной совокупностью негативных факторов (таблица 2.2), а именно месторождения твердых полезных ископаемых, отработка которых ведется открытым способом при помощи углубочной кольцевой системы разработки. Последние же характерны для большинства карьеров по добыче железной руды в России.

Таблица 2.2 – Характерные для углубочных систем разработки геометрические факторы технологических трасс транспортирования, приводящие к осложнению горнотехнических условий эксплуатации карьерных автосамосвалов (составлено автором)

Система разработки	Геометрия отдельных участков трассы			Сочетания соседних участков между собой
	Средневзвешенный продольный уклон	Средневзвешенный поперечный уклон	Средневзвешенная величина кривизны	
УДО	-	+	-	-
УДД	-	+	-	-
УПО	+	-	-	-
УПД	+	-	-	-
УВР	-	+	+	+
УКЦ	+	+	+	+

2.5 Обоснование выбора самосвалов для установления зависимости сокращения срока службы их подвесок от группы параметров трасс транспортирования

С учетом вышеизложенного, с целью апробации предлагаемой методики оценки негативного влияния осложненных горнотехнических условий эксплуатации на сокращение срока службы подвесок карьерных автосамосвалов предлагается выбрать Качканарский горно-обогатительный комбинат, на котором производится добыча железных руд двух находящихся рядом месторождений Гусевогорском (ГГМ) и Собственно Качканарском (СКМ).

Оба месторождения отрабатываются открытым способом, для чего были построены следующие карьеры:

- Гусевогорское месторождение: карьеры Главный, Западный, Северный и ныне не действующий Южный;
- Собственно Качканарское месторождение, карьер нагорного типа (транспортирование горной массы происходит сверху вниз) носит это же название.

Для всех пяти карьеров характерна углубочная кольцевая система разработки, что обуславливает осложнение горнотехнических условий эксплуатации карьерных автосамосвалов.

Транспортирование горной массы обеспечивается парком карьерных автосамосвалов и тяговых агрегатов с думпкарами. В настоящий момент карьерные автосамосвалы транспортируют вскрышу с рабочих горизонтов на отвалы напрямую, а полезное ископаемое от забоя до промежуточного склада, где канатные экскаваторы перегружают руду в думпкары железнодорожного состава, который транспортирует её из карьера на обогатительную фабрику.

Парк карьерных автосамосвалов представлен 16 единицами 240тонных самосвалов БЕЛАЗ-7531, функционирующих исключительно на СКМ и Северном карьерах, а также 24 единицами 130 тонных БЕЛАЗ-75131, функционирующих на всех карьерах. В качестве второго предприятия для выявления зависимостей предлагается выбрать Ковдорский горно-обогатительный комбинат, на котором также производится добыча железной руды. На рассматриваемом предприятии отработка рудного тела ведется на руднике «Железный» открытым способом при помощи углубочной кольцевой системы разработки, тем самым используемые карьерные автосамосвалы эксплуатируются также в осложненных горнотехнических условиях. Транспортная техника представлена парком карьерных автосамосвалов сразу трех фирм: БЕЛАЗ, *KOMATSU* и *Caterpillar*. Из которого: БЕЛАЗ-75307 – 5 ед., БЕЛАЗ-75313 – 7 ед., БЕЛАЗ-75139 – 9 ед., БЕЛАЗ-75180 – 2 ед., *CAT-789D*–22 ед., *CAT-785C* – 17 ед., *HD-785-7* –7 ед. [25].

Оба предприятия оборудованы автоматизированной системой управления горнотранспортным комплексом «Карьер» версии 1.6, позволяющей в реальном времени получать информацию с систем удаленного мониторинга технического состояния машин, а также сохранять её в модуль архивирования с целью возможной выгрузки технологических отчетов за выбранный период, как по конкретной машине, так и по всему парку техники. Ремонтные службы обоих предприятий ведут журналы, в которых фиксируют информацию о простоях карьерных автосамосвалов, а также итоговом месячном значении КТИ по каждой единице техники.

Для проведения дальнейших исследований следует выбрать рассматриваемую группу машин. С целью исключения различных варьируемых

факторов следует выбрать автосамосвалы, которые удовлетворяют следующим требованиям:

- транспортируют горную массу с не варьируемыми для учета в горно-геологическими параметрами (средний размер куска, насыпная плотность, адгезионные свойства и т.д.);

- имеют постоянные маршруты транспортирования, за исключением перемещения точки погрузки, вызванной продвижением фронта выемочных работ, и перемещения точки разгрузки вскрышных пород на отвале, вызванной его наращиванием;

- загружаются одними и теми же экскаваторами, управляемыми одними и теми же операторами, в соответствии с неизменными паспортами погрузки.

Таким образом, в дальнейших исследованиях будут рассматриваться маршруты транспортирования с используемыми на них карьерными автосамосвалами, представленным в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Сведения о маршрутах транспортирования, рассматриваемых в исследовании, и задействованных на них автосамосвалах (составлено автором)

ГОК	Модель самосвала	Начальная точка маршрута	Конечная точка маршрута	Количество самосвалов
Качканарский	БЕЛА3-7530	Карьер СКМ гор. +710м	Отвал СКМ гор. +530м	2
		Карьер СКМ гор. +710м	Перегрузочный пункт СКМ гор. +495м.	4
		Участок 1 гор. +605м	Отвал СКМ гор. +530м	2
		Участок 1 гор. +605м	Перегрузочный пункт СКМ гор. +495м.	3
	БЕЛА3-7513	Гор. +39м	Перегрузочный пункт Западного карьера гор. +153м	6
Ковдорский	БЕЛА3-7513	Гор. +130м	РДКК рудника «Железный», гор. +304м	2
		Гор. -184м		7
	БЕЛА3-7530	Гор. -155м		5
		Гор. -184м		2

Информация о выполненных ими за рассматриваемый период рейсах представлена в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Маршруты транспортирования, количество задействованных на них самосвалов и выполненных ими рейсов за 2020-2023 гг. (составлено автором)

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

Следует рассмотреть по отдельности каждый из факторов, приводящих к снижению ресурса подвесок карьерных автосамосвалов:

1. Режимы работы карьерных автосамосвалов.

На обоих предприятиях внедрена система контроля за текущей скоростью движения машины, что позволяет поддерживать скоростной режим в установленных предприятием пределах, одинаковых для обоих предприятий. Для количественной оценки рассматриваемого фактора предлагается выбрать среднюю скорость движения на маршруте v_{cp} , м/с, которая определяется исходя из выгружаемых из АСУ ГТК «Карьер» эксплуатационных отчетов.

С целью оценки влияния выбранного фактора на сокращение срока службы подвески следует воспользоваться проверкой по критерию согласия Пирсона χ^2 , определяемому согласно выражению (2.12):

$$\chi_{\text{эмп}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i - f_{mi})^2}{\sum_{i=1}^n f_{mi}}, \quad (2.12)$$

где n – число групп, на которое разбито эмпирическое распределение;

f_i – наблюдаемая частота признака в i -ой группе;

f_{mi} – частота параметра.

Для найденного значения эмпирического критерия Пирсона $\chi_{\text{эмп}}^2$ и числа степеней свободы $\gamma = n - 1$ по известным таблицам критических значений

критерия Пирсона в зависимости от уровня значимости α [18] определяется соответствующее критическое значение критерия Пирсона $\chi_{\text{крит}}^2$. В том случае, если $\chi_{\text{эмп}}^2 > \chi_{\text{крит}}^2$, то можно утверждать между рассматриваемым фактором и параметром существует зависимость.

Таким образом, для фактора средней скорости движения на маршруте, выражению (2.12) получим:

$$\chi_{\text{эмп}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i - f_{mi})^2}{\sum_{i=1}^n f_{mi}} = 7,86$$

Так как $\chi_{\text{эмп}}^2 < \chi_{\text{крит}}^2$; $7,86 < 21,026$, то это говорит о недостаточной связи между распределением величин рассматриваемых фактора и параметра. Следовательно, можно утверждать, что между средней скоростью движения и относительным снижением наработки до отказа подвесок карьерных автосамосвалов связи нет, и в рамках дальнейших исследований этот фактор можно не учитывать.

2. Природно-климатические условия.

Среди многообразия критериев этого фактора наибольший интерес представляет температура окружающей среды. В рамках исследования предлагается использовать среднесуточную температуру окружающей среды $t_{\text{окр.ср.}}$, °С. Несмотря на различное географическое расположение рассматриваемых предприятий, среднесуточная температура на обоих предприятиях отличается незначительно (рисунок 2.15). Следовательно, этот фактор можно принять одинаковым для обоих предприятий.

Климат Ковдора												
Показатель	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сен.	Окт.	Нояб.	Дек.
Средняя температура, °С	-11,3	-10,9	-6,5	-0,9	5,0	11,0	14,3	11,8	6,8	0,2	-5,3	-8,4
Норма осадков, мм	41	33	35	36	49	68	84	68	56	57	40	42
Год	609											

Климат Качканара												
Показатель	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сен.	Окт.	Нояб.	Дек.
Средний максимум, °С	-12,6	-10,2	-2,3	5,6	14,2	18,8	21,3	18,3	12,2	4	-4,9	-10,2
Средняя температура, °С	-15,3	-13,3	-5,8	1,3	9,4	14,7	17,3	14,6	8,9	1,5	-7,2	-12,8
Средний минимум, °С	-18,3	-16,7	-9,9	-3,8	3,3	9,5	12,5	10,4	5,5	-1	-9,8	-15,4
Норма осадков, мм	29	23	38	42	61	95	90	91	74	54	42	30

Рисунок 2.15 – Среднемесячная температура на рассматриваемых предприятиях [78, 79]

Таким образом, установим значение коэффициента детерминации для рассматриваемого фактора выражению (2.12):

$$\chi_{\text{эмп}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i - f_{mi})^2}{\sum_{i=1}^n f_{mi}} = 24,21$$

Ввиду того, что $\chi_{\text{эмп}}^2 > \chi_{\text{крит}}^2$; $24,21 > 21,026$, то связь между рассматриваемыми величинами является сильной, и, следовательно, существует корреляция. Вопрос влияния совокупности климатических и горнотехнических условий на надежность узлов различных карьерных горно-транспортных машин был в достаточной и полной мере исследован в научной литературе [10, 34, 112], следовательно, в рамках дальнейших исследований этот фактор не требует дополнительного рассмотрения.

3. Квалификация оператора.

Ввиду того, что управление автосамосвалом производится одной и той же группой операторов, которые закреплены за конкретной машиной, и так как маршруты транспортирования изменяются незначительно, то этим фактором можно пренебречь.

4. Вес перевозимой горной массы и его распределение по площади кузова.

На обоих рассматриваемых предприятиях нашли активное применение системы контроля весом горной массы в кузове самосвала, а также системы точного позиционирования рабочего оборудования экскаваторов с целью формирования корректной «шапки» породы в кузове в соотношении 2:1.

Анализ выгружаемых отчетов с детализацией информации о выполненных рейсах (рисунок 2.16) показал, что применение описанных инструментов привело к тому, что на Качканарском ГОКе при среднесуточном числе выполняемых рейсов автосамосвалов БЕЛАЗ-75131 и БЕЛАЗ-7530 равном примерно 370, число рейсов, когда масса породы в кузове превышала номинальную грузоподъемность более чем на 10%, составило всего 12. При этом максимальная фактическая масса породы, перевозимая самосвалом, составила всего 112% от номинальной.

Модель	№	эскават	Пункт разгрузки	Вид груза	Расстояние, км.	Ож. погр.	Время уст. под погрузку			Время погрузки			Загрузка		
							Норма	Факт	Откл.	Норма	Факт	Откл.	Норма	Факт	%
БелАЗ-75131	12	72	зПП-1.3	Руда	2,31	0:07:25	0:00:00	0:01:17	0:01:17	0:06:54	0:11:33	0:04:39	130	132	102
БелАЗ-75131	12	72	зПП-1.3	Руда	2,27	0:08:54	0:00:00	0:00:08	0:00:08	0:06:54	0:07:25	0:00:31	130	130	100
БелАЗ-75131	12	72	зПП-1.2	Руда	2,27	0:00:20	0:00:00	0:00:18	0:00:18	0:06:54	0:05:30	-00:01:24	130	136	105
БелАЗ-75131	12	72	зПП-1.3	Руда	2,28	0:05:58	0:00:00	0:00:17	0:00:17	0:06:54	0:04:26	-00:02:28	130	132	102
БелАЗ-75131	12	72	зПП-1.3	Руда	2,31	0:00:48	0:00:00	0:00:07	0:00:07	0:06:54	0:05:50	-00:01:04	130	139	107
БелАЗ-75131	12	72	зПП-1.3	Руда	2,32	0:07:16	0:00:00	0:00:32	0:00:32	0:06:54	0:07:20	0:00:26	130	128	98
БелАЗ-75131	12	72	зПП-1.2	Руда	2,27	0:06:56	0:00:00	0:00:14	0:00:14	0:06:54	0:05:37	-00:01:17	130	133	102
БелАЗ-75131	12	72	зПП-1.2	Руда	2,28	0:46:56	0:00:00	0:00:14	0:00:14	0:06:54	0:04:00	-00:02:54	130	133	102

Рисунок 2.16 – Фрагмент выгруженного отчета детализации рейсов по операциям карьерных автосамосвалов Качканарского ГОКа (составлено автором)

Таким образом, становится возможным утверждать, что масса перевозимой породы варьируется незначительно, и, следовательно, рассматриваемый фактор в дальнейших исследованиях можно не учитывать.

5. Срок эксплуатации машины.

Для проведения исследований были выбраны автосамосвалы БЕЛАЗ-7513 и БЕЛАЗ-7530 с одинаковым периодом ввода в эксплуатацию (так как они были приобретены партией и почти одновременно были введены в эксплуатацию): для Качканарского ГОКа это был август 2022, а для Ковдорского ГОКа – январь 2020. Таким образом, за период работы предприятия в 1,5 года для каждого ГОКа, срок эксплуатации машин был примерно одинаковым. Таким образом, в рамках дальнейших исследований этот фактор можно не учитывать.

6. Группа параметров технологической трассы транспортирования.

Как утверждалось выше, предлагается рассматривать группу параметров технологической трассы транспортирования как сумму трех факторов, а именно: геометрии отдельных участков трассы транспортирования $C_{\text{геом}}$, сочетания соседних участков между собой $C_{\text{соч}}$ и макропрофиль участков $C_{\text{кач}}$.

Среди основных параметров в аналитических отчетах систем диспетчеризации была использована информация о начальном и конечном пункте рейса, средняя скорость движения на участке, средний продольный и поперечный уклон, радиус поворота на криволинейных участках. Таким образом, для был сформирован массив данных на основе данных из карьеров СКМ и Западного

карьера ГГМ Качканарского ГОКа, а также карьера рудника «Железный» Ковдорского ГОКа. При проведении проверки по критерию согласия Пирсона χ^2 для числа степеней свободы равному 44 и уровню значимости 0,1 для каждого из фактора получим следующее (таблица 2.5):

Таблица 2.5 – результаты проверки по критерию согласия Пирсона факторов, характеризующим параметры технологической трассы транспортирования (составлено автором)

Фактор	Эмпирическое значение критерия Пирсона $\chi_{\text{эмп}}^2$	Критическое значение критерия Пирсона $\chi_{\text{крит}}^2$
$C_{\text{геом}}$	92,12	78,75
$C_{\text{соч}}$	83,36	
$C_{\text{кач}}$	87,91	

Так как для каждого из факторов справедливо соотношение $\chi_{\text{эмп}}^2 > \chi_{\text{крит}}^2$, следовательно, каждый из рассматриваемых факторов проходит проверку по критерию согласия Пирсона и является значимым, что позволяет утверждать, что фактор параметров технологической трассы транспортирования так же является значимым.

Таким образом, анализ факторов, обуславливающих, сокращение срока службы подвески карьерных автосамосвалов, показал следующее:

- режимы работы автосамосвалов, характеризующееся средней скоростью движения на маршруте, не является значимым фактором;
- квалификация оператора, соблюдение паспорта погрузки и срок службы машины в ходе эксперимента не варьируются в достаточной для значимости степени;
- природно-климатические условия функционирования автосамосвалов является значимым фактором, но рассматривался в предыдущих исследованиях;
- группа параметров технологической трассы транспортирования, включающие в себя три фактора, является значимым фактором.

Подводя итог, можно утверждать, что посредством установления связи между каждым из факторов и сокращения срока службы подвески методами регрессионного анализа становится возможным оценить негативное влияние

осложненных горнотехнических условий эксплуатации, обусловленных технологической трассой транспортирования, согласно выражению (2.13):

$$\Delta T = k_0 + k_1 C_{\text{геом}} + k_2 C_{\text{соч}} + k_3 C_{\text{кач}}, \quad (2.13)$$

где k_0 – свободный член регрессионного уравнения;

k_1, k_2, k_3 – коэффициенты регрессионного уравнения.

2.6 Выводы по Главе 2

На примере двух проектов по модернизации транспортных систем предприятий по добыче железной руды в РФ, определены основные причины усложнения горнотехнических условий, обусловленных факторами технологических трасс транспортирования горной массы, приводящих к сокращению срока службы подвесок карьерных автосамосвалов. Среди них были отмечены следующие: давность ввода в эксплуатацию транспортных выработок, существенная разница между величинами продольных уклонов соседних участков технологической трассы транспортирования и выбор материала верхнего дорожного слоя, не обеспечивающий поддержание установленного коэффициента трения качения.

В качестве инструмента для оценки горнотехнических условий эксплуатации на сокращение срока службы подвесок была выбрана подсистема контроля загрузки и топлива системы удаленного мониторинга карьерных автосамосвалов, включающая в себя смонтированные и интегрированные в единый комплекс регистраторы давления рабочего тела в полостях четырех пневмогидравлических цилиндров подвески.

Установлены основные факторы, приводящие к сокращению срока службы подвески карьерных автосамосвалов: режимы работы автосамосвалов, природно-климатические условия эксплуатации машины, квалификация оператора, вес перевозимой горной массы и его распределение по площади кузова, срок эксплуатации машины и группа параметров технологической трассы транспортирования.

Предложен способ количественной оценки негативного влияния параметров технологической трассы транспортирования на срок службы подвески карьерного

автосамосвала. Согласно нему, группу параметров технологической трассы транспортирования следует разделить на три ключевых фактора: геометрию отдельных участков трассы транспортирования, включающую в себя три подфактора, а именно средневзвешенный продольный уклон трассы, средневзвешенный поперечный уклон трассы, средневзвешенную криволинейность трассы, сочетания соседних участков между собой и макропрофиль участков трассы. Для каждого фактора и подфактора были предложены способы их количественной оценки напрямую и посредством регистрации давления в пневмогидроцилиндрах подвески. При помощи установления связи между совокупным влиянием предлагаемых факторов и сокращения срока службы подвески становится возможным оценить негативное влияние осложненных горнотехнических условий эксплуатации, обусловленных технологической трассой транспортирования горной массы.

При проведении анализа связи между отдельными факторами предлагаемой методики и системами разработки месторождений твердых полезных ископаемых открытым способом согласно классификации В.В. Ржевского, установлено, что для достижения задачи по установлению зависимости между факторами технологических трасс транспортирования, приводящих к осложнению горнотехнических условий эксплуатации карьерных автосамосвалов, и снижением срока службы подвесок карьерных автосамосвалов, согласно предлагаемой методике, в первую очередь следует рассматривать месторождения с трассами транспортирования, обладающими наиболее выраженной совокупностью выявленных негативных факторов, а именно относящихся к углубочной кольцевой системе разработки, к которым относится большинство месторождений железной руды в России.

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ГРУППЫ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРАСС ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ НА СОКРАЩЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ПОДВЕСОК КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ

3.1 Определение геометрических параметров участков рассматриваемых маршрутов

На каждом из рассматриваемых объектов маршруты транспортирования разбивались на участки различной длины между «маяками», устанавливаемыми маркшейдерскими службами (рисунок 3.1) Среди основных параметров в аналитических отчетах систем диспетчеризации фигурировала информация о начальном и конечном пункте рейса, средняя скорость движения на участке и т.д.



Рисунок 3.1 – Расположение точек маршрута в программе *MineVision* (составлено автором)

Основные геометрические параметры, такие как средний продольный и поперечный уклон, радиус поворота на криволинейных участках и т.д., были взяты из сводных отчетов маркшейдерских служб предприятий, геоинформационных моделей, легшим в основу принципа разделения маршрутов транспортирования на участки, а также паспортов выработок, формируемых для каждой из выработок, подписываемых по окончании их строительства непосредственно перед приемом в эксплуатацию (рисунок 3.2). Подобные документы утверждаются сроком на 1 год и обязаны храниться еще 2 года после окончания срока действия.

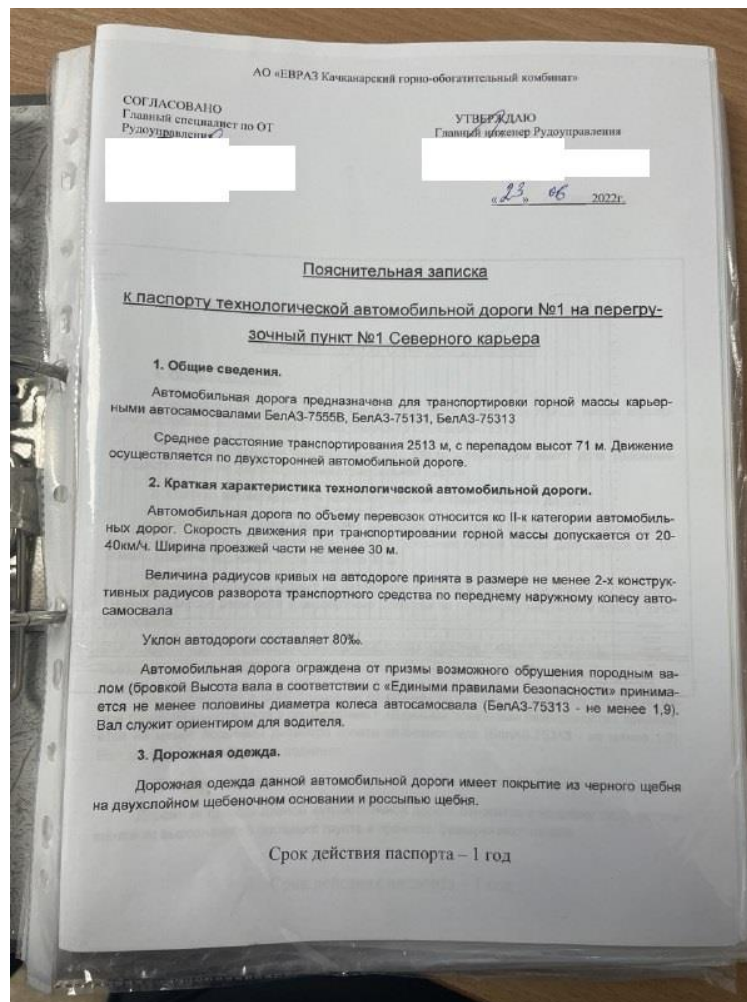


Рисунок 3.2 – Пояснительная записка, прилагаемая к паспорту принятия в эксплуатацию выработки на Качканарском ГОКе (фото автора)

Таким образом, был сформирован массив данных на основе обозначенных документов для карьеров СКМ (рисунок. 3.3 и таблица 3.1) и Западного карьера

ГТМ (рисунок 3.4 и таблица 3.2) Качканарского ГОКа, а также карьера рудника «Железный» Ковдорского ГОКа (рисунок 3.5 и таблица 3.3).

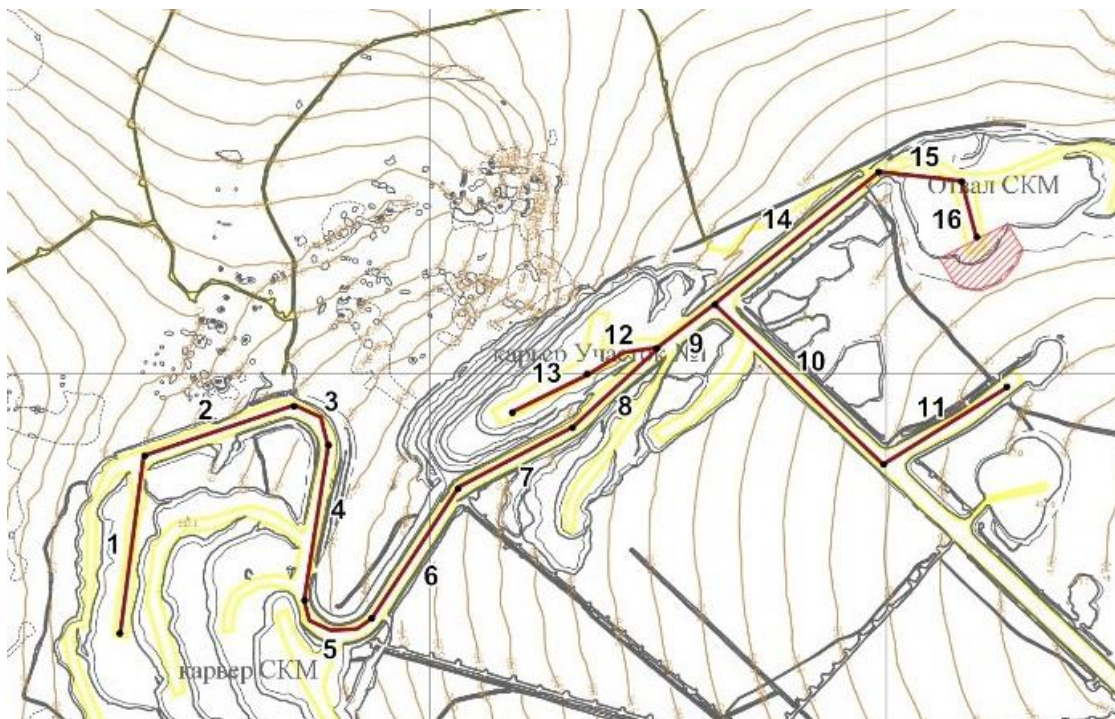


Рисунок 3.3 – Расположение участков трассы на плане СКМ Качканарского ГОКа
(составлено автором)

Таблица 3.1 – Геометрические параметры участков трасс транспортирования горной массы на карьерах СКМ Качканарского ГОКа (составлено автором)

Номер участка	Высота начала участка, м	Длина участка, м	Продольный уклон, ‰	Поперечный уклон, ‰	Криво-линейность
1	710	417	0	2	0
2	700	367	82	3	0
3	670	133	75	3	66
4	660	367	27	3	0
5	650	167	60	3	83
6	640	367	68	3	0
7	615	300	117	2	0
8	580	267	75	2	0
9	560	167	60	2	0
10	550	550	73	3	0
11	510	333	45	5	0
12	605	200	75	2	0
13	590	167	60	2	0
14	580	483	62	3	0
15	550	217	92	3	160
16	530	133	38	3	0

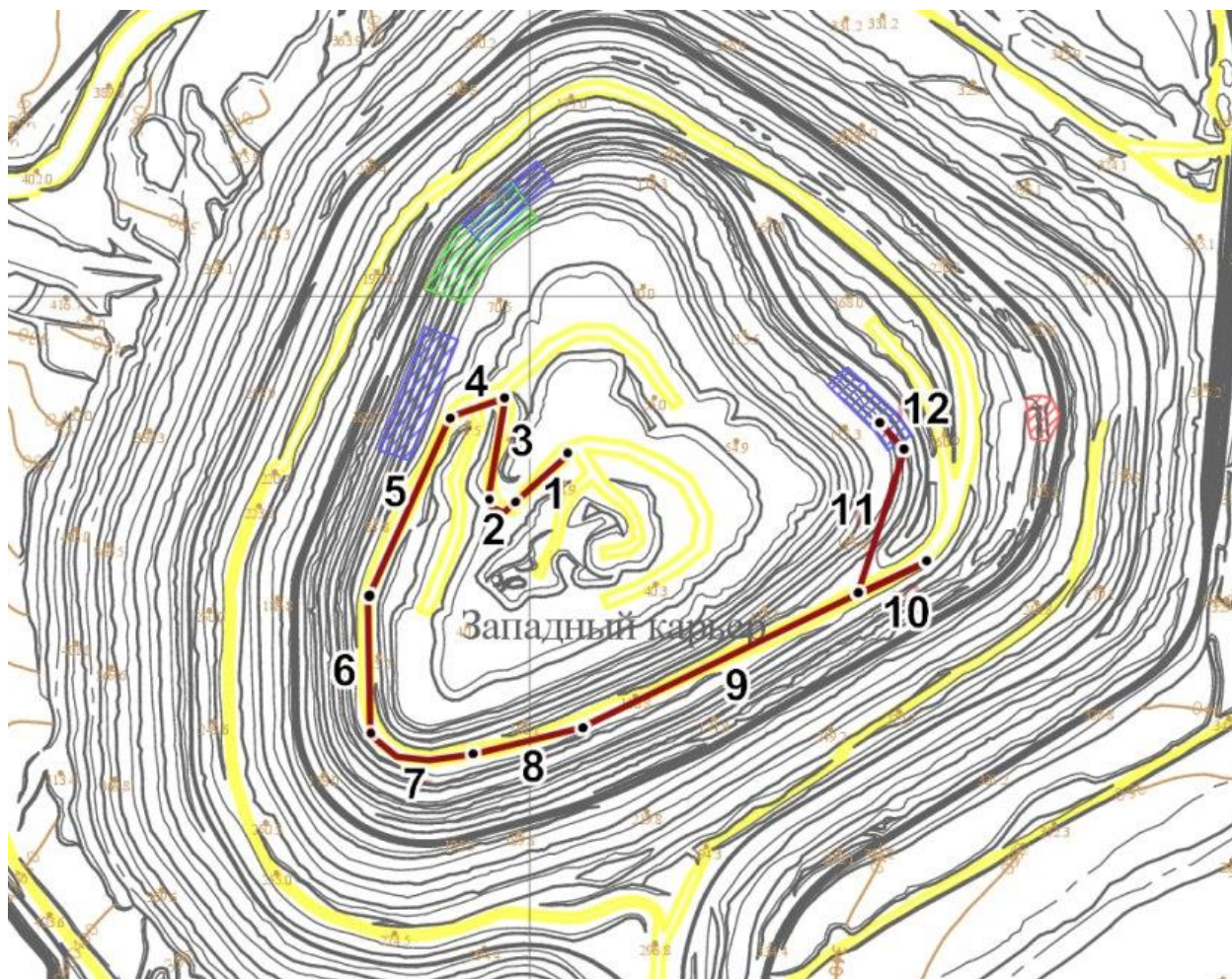


Рисунок 3.4 – Расположение участков трассы на плане Западного карьера Качканарского ГОКа (составлено автором)

Таблица 3.2 – Геометрические параметры участков трассы транспортирования железной руды на Западном карьере Качканарского ГОКа (составлено автором)

Номер участка	Высота начала участка, м	Длина участка, м	Продольный уклон, ‰	Поперечный уклон, ‰	Криволинейность
1	38,9	90	0	0	0
2	38,9	49	84	3	104,4
3	43	139	86	2	0
4	55	77	26	3	0
5	57	258	110	4	0
6	85,2	188	73	2	0
7	99	132	60	5	139,2
8	107	146	81	3	0
9	118,8	397	36	2	0
10	133,2	209	96	2	378
11	153,3	111	0	3	0

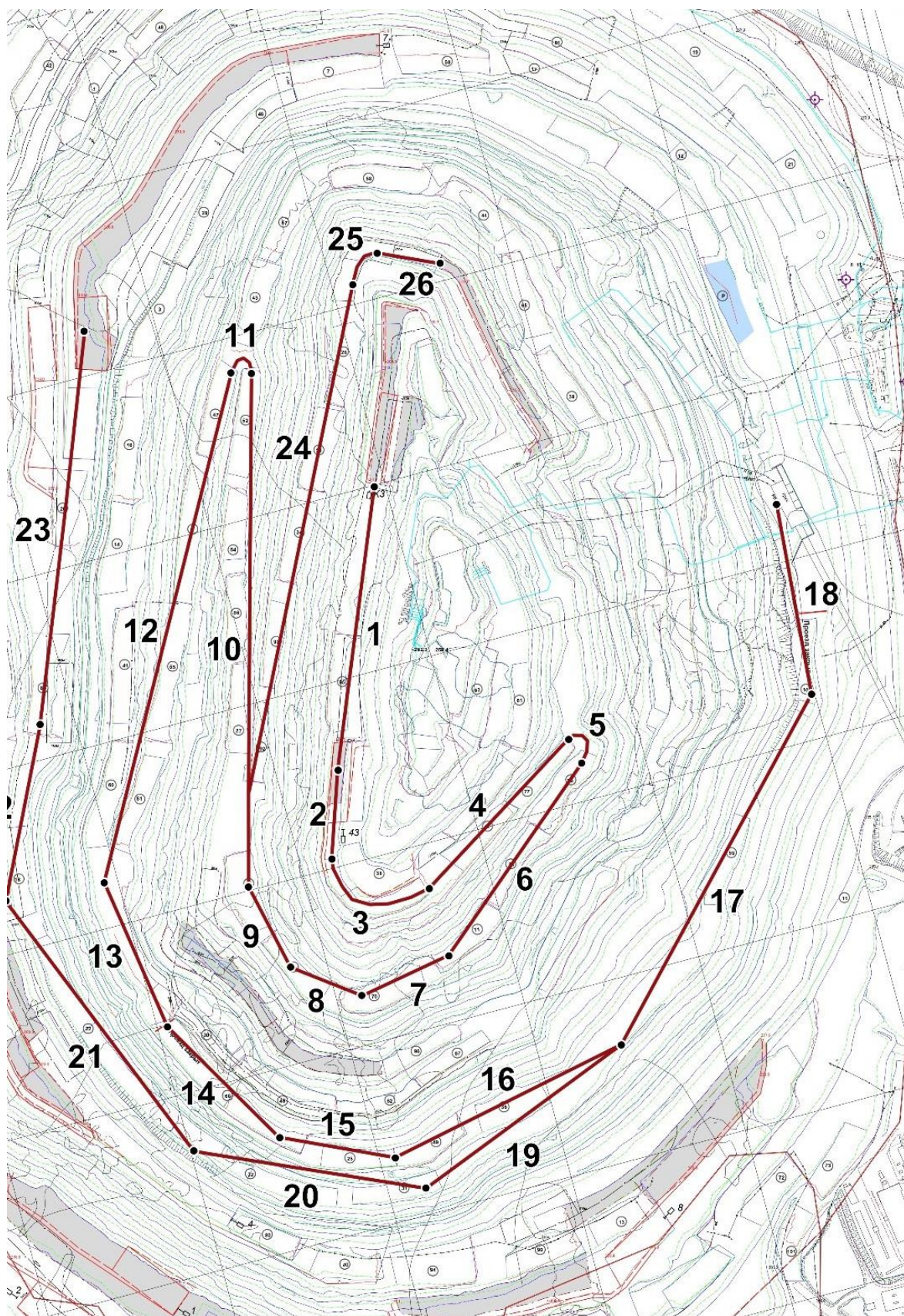


Рисунок 3.5 – Расположение участков трассы на плане рудника «Железный»
Ковдорского ГОКа (составлено автором)

Таблица 3.3 – Геометрические параметры участков трассы транспортирования железной руды на руднике «Железный» Ковдорского ГОКа (составлено автором)

Номер участка	Высота начала участка, м	Длина участка, м	Продольный уклон, ‰	Поперечный уклон, ‰	Криво-линейность
1	-184	468	32	0	0
2	-199	145	111	2	0
3	-215	204	0	2	127,5
4	-215	340	74	3	0
5	-190	85	71	4	59,5
6	-184	383	128	2	0
7	-135	162	124	1	0
8	-115	128	133	2	0
9	-98	153	118	3	0
10	-80	833	79	2	0
11	-14	68	29	4	42,5
12	-16	850	139	3	0
13	102	255	118	5	0
14	132	264	83	2	0
15	154	187	123	1	0
16	177	400	153	2	0
17	238	655	61	1	0
18	278	315	83	2	0
19	238	383	52	3	0
20	218	374	70	4	0
21	192	510	51	2	0
22	166	289	42	3	0
23	154	646	37	5	0
24	-96	833	62	5	0
25	-148	94	75	2	59,5
26	-155	111	136	1	0

Информация о начальной и конечной точках каждого из девяти маршрутов транспортирования, рассматриваемых в исследовании (согласно таблице 2.3), их номерах и порядке преодоления составляющих участков, количестве задействованных карьерных автосамосвалов на них и суммарной составной длине каждого маршрута, приведена в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Параметры маршрутов транспортирования горной массы на рассматриваемых карьерах (составлено автором)

№	Начальная точка маршрута	Конечный пункт маршрута	Номера преодолеваемых участков	Количество автосамосвалов на маршруте	Длина маршрута, м
1	Карьер СКМ гор. +710м	Отвал СКМ гор. +530м	1-9-14-15-16	2	3382
2	Карьер СКМ гор. +710м	Перегрузочный пункт СКМ гор. +495м.	1-11	4	3432
3	Участок 1 гор. +605м	Отвал СКМ гор. +530м	12-13-9-14-15-16	2	1366
4	Участок 1 гор. +605м	Перегрузочный пункт СКМ гор. +495м.	12-13-9-10-11	3	1416
5	Гор. +39м Западного карьера	Перегрузочный пункт Западного карьера гор. +153 м	1-11	6	1796
6	Гор. +130м	РДКК рудника «Железный», гор. +304м	1-18	8	3171
7	Гор. -184м		26-24-10-18	4	5891
8	Гор. -155м		23-19-17-18	5	4862
9	Гор. -184м		1-18	3	3171

3.1.1 Установление величины давления в подвесках на участках технологических трасс транспортирования горной массы

Как уже утверждалось ранее, информация о величине давления в пневмогидроцилиндрах подвесок карьерных автосамосвалов, бралась согласно выгрузкам аналитических отчетов из базы данных, полученных при помощи модуля диспетчеризации АСУ ГТК «Карьер». Так как в модуле диспетчеризации АСУ ГТК «Карьер» осуществлялся сбор информации лишь о величине силы тока в датчиках давления (рисунок 3.6), идущей от преобразователей давления в пневмогидроцилиндрах подвески, то с целью достижения поставленной задачи, было установлено, что для регистрации значения давления в подвесках, в конструкции использовался преобразователь давления MBS 1200 [91]. Согласно его графику зависимости сопротивления нагрузки от напряжения питания

(рисунок 3.7) было установлено эквивалентное сопротивление в датчике, а затем и величина давления в пневмогидроцилиндрах подвески.

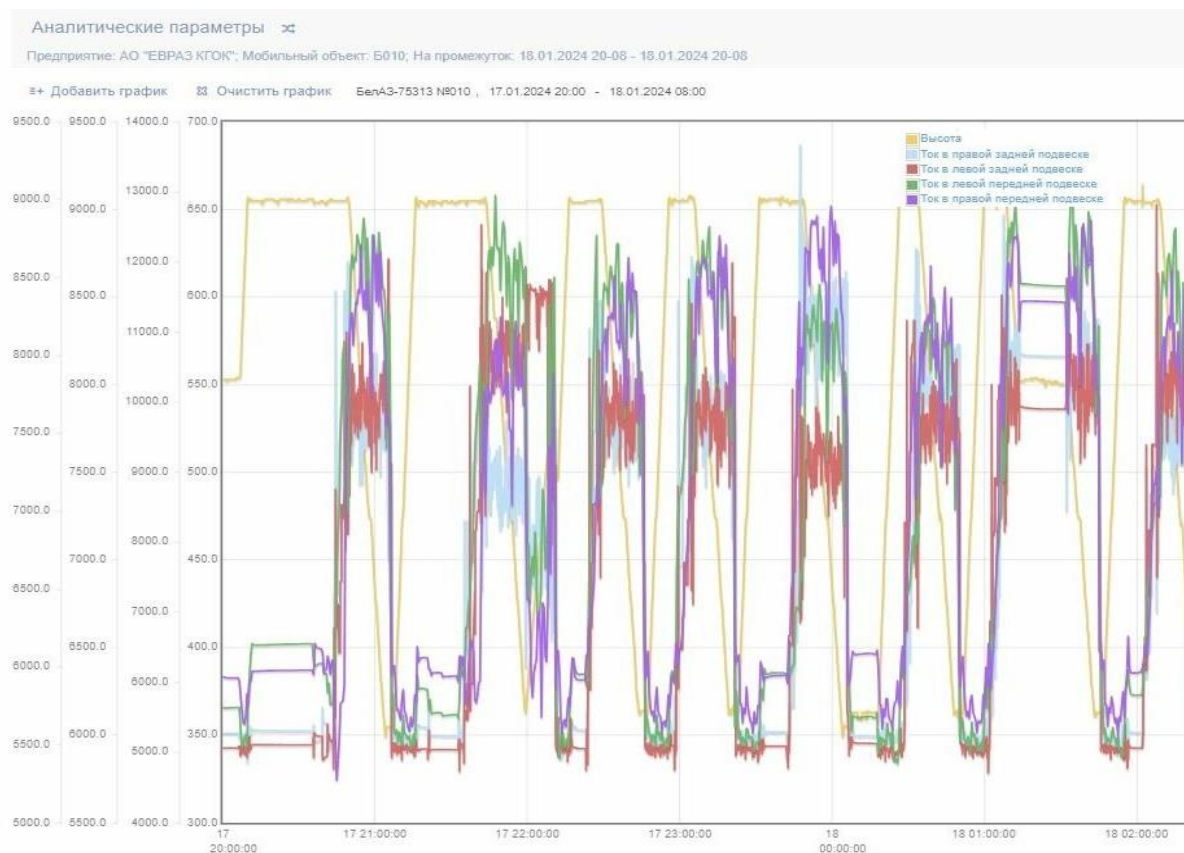


Рисунок 3.6 – Отображение информации о величине тока в модуле диспетчеризации АСУ ГТК «Карьер» от подвесок автосамосвала БЕЛАЗ-7530 (составлено автором)

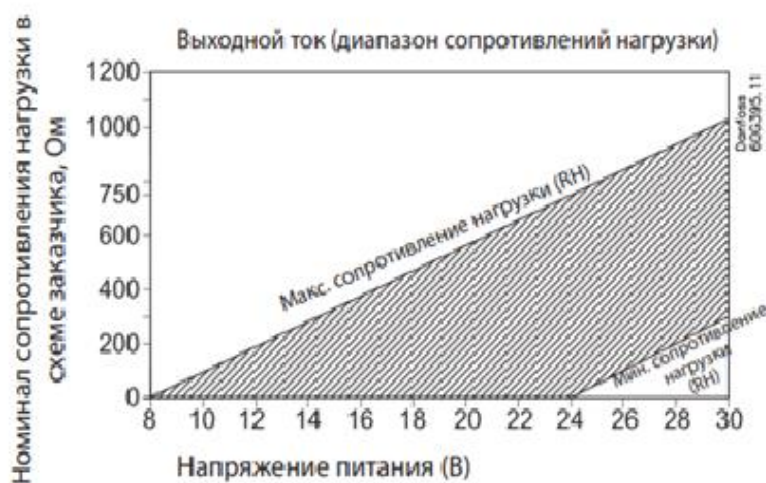


Рисунок 3.7 – Преобразователь давления MBS 1200 и его график зависимости сопротивления нагрузки от напряжения питания (составлено автором)

Таким образом, была получена информация о давлении в пневмогидроцилиндрах подвесках (рисунок 3.8).

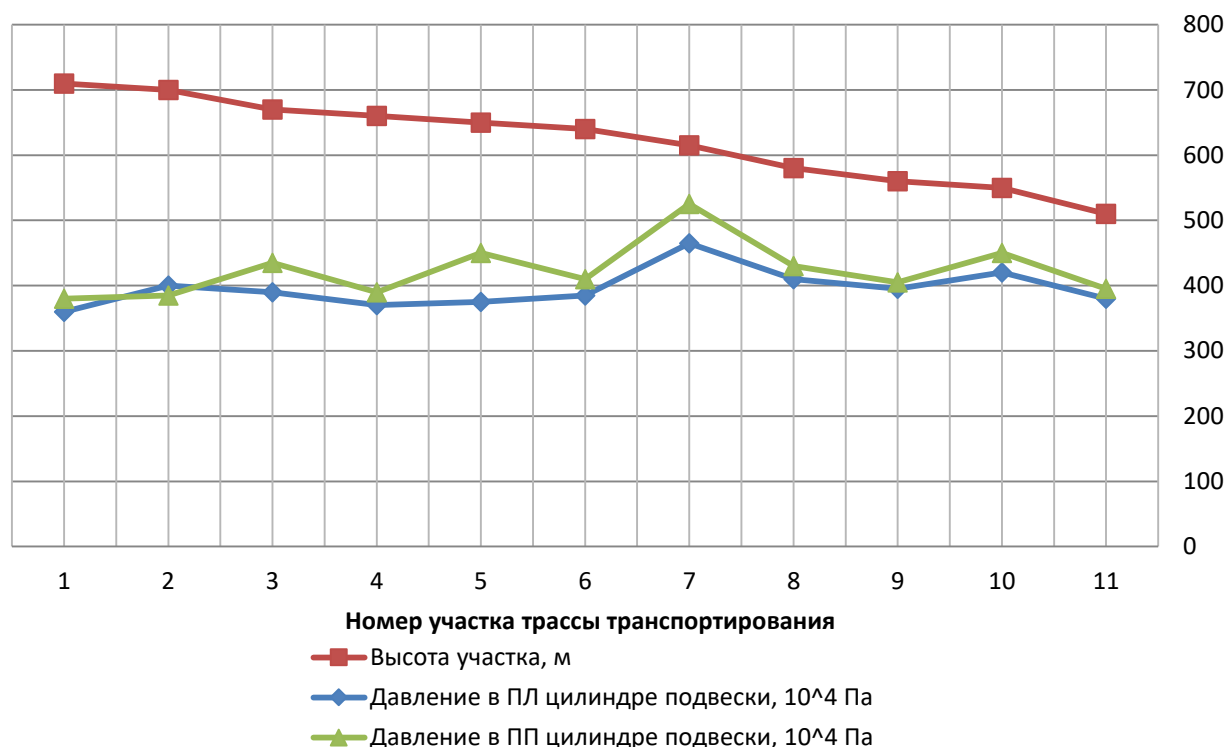


Рисунок 3.8 – Изменение давления в передних подвесках автосамосвала БЕЛАЗ-7530 на участках трассы транспортирования маршрута №2 (составлено автором)

3.1.2 Выявление зависимости между параметрами трасс транспортирования и величиной сокращения срока службы подвесок

За период с января 2020 года по декабрь 2022 года была собрана и проанализирована статистика об отказах различных узлов и агрегатов машин на основе бортовых журналов карьерных автосамосвалов, эксплуатируемых для транспортирования железной руды на Качканарском и Ковдорском ГОКах, полученных из модуля архивирования системы удаленного мониторинга «Карьер», а также журналов сервисных служб указанных предприятий.

Всего за указанный период было зафиксировано 180 отказов подвесок карьерных автосамосвалов, которые были задействованы для транспортирования железной руды на маршрутах, представленных в таблице 3.4. Информация о среднем сроке службы подвески автосамосвалов, задействованных на каждом из рассматриваемых маршрутов, представлена в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Сведения о среднем сроке службы подвесок автосамосвалов, задействованных на каждом из рассматриваемых маршрутов за 2020-2022 гг. (составлено автором)

Модель автосамосвала	Номер маршрута	Количество автосамосвалов	Средний срок службы подвески, ч.
БЕЛА3-7530	1	2	9381
	2	4	9325
	3	2	9067
	4	3	9143
БЕЛА3-7513	5	6	8269
БЕЛА3-7530	6	5	8721
	7	2	8964
БЕЛА3-7513	8	2	8064
	9	7	8519

Посредством проведения трехфакторного регрессионного анализа обозначенных данных за обозначенный период была математическая модель (3.1):

$$\Delta T = 5,38 + 5,99C_{\text{геом}} + 7,32C_{\text{соч}} + 2,69C_{\text{кач}} \quad (3.1)$$

Статистические параметры полученной модели представлены в таблице 3.6. Таблица 3.6 – Статистические параметры полученной регрессионной модели (составлено автором)

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	

Согласно данным, представленным в таблице 3.6, для полученной математической модели (3.1), справедливо утверждение, что ее параметры значимы согласно проверке по критерию Стьюдента и адекватны по критерию Фишера, что говорит об адекватности полученной модели.

Как отмечалось в главе 2.2, нормативный срок службы подвески, принятый на предприятиях, равен 10000 часам. Таким образом, фактическое сокращение срока службы за период 2020-2022 гг. в сравнении с номинальным составило от 6 и до 20% (таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Сравнение номинального срока службы подвесок со средним за 2020-2022 гг. (составлено автором)

Номер маршрута	Средний срок службы подвески, ч.	Удельное снижение номинального срока службы подвески, %
1	9381	6,19
2	9325	6,75
3	9067	9,33
4	9143	8,57
5	8269	17,31
6	8721	12,79
7	8964	10,36
8	8064	19,36
9	8519	14,81

В качестве проверки полученного выражения (3.1) производилось сравнение полученного расчетным способом значения среднего сокращения срока службы подвески с фактически зарегистрированным за 2023 г. (таблица 3.8).

Таблица 3.8 – Сравнение расчетного срока службы подвесок с фактическим за 2023 г. (составлено автором)

Номер маршрута	Среднее фактическое сокращение срока службы подвески, ч.	Среднее расчетное сокращение срока службы подвески, ч.	Расхождение между расчетным и фактическим, %
1	683	651	4,69
2	719	693	3,62
3	985	917	6,90
4	903	853	5,54
5	1777	1547	12,94
6	1305	1204	7,74
7	1373	1237	9,91
8	1988	1833	7,80
9	1481	1567	9,46

Исходя из таблицы 3.8 видно, что максимальное расхождение расчетного сокращения срока службы с фактически зарегистрированным составило 13%, что также свидетельствует об адекватности полученного выражения (3.1).

3.2 Обоснование критерия рационализации межремонтного периода подвесок карьерных автосамосвалов

В настоящее время на предприятиях горной отрасли в России, ведущих отработку месторождений твердых полезных ископаемых открытым способом,

применяются два подхода к техническому обслуживанию и ремонту узлов горных машин, а именно:

I. На основе статического анализа причин и периодичности отказов оборудования. Эта модель требует сбора и классификации информации об отказах однотипных объектов;

II. На основе контроля технического состояния элементов и узлов машины в купе с прогнозированием их остаточного ресурса. Эта модель требует непрерывного и желательно удаленного мониторинга технического состояния объекта [19, 47].

На сегодняшний момент все предприятия горной отрасли в России, на которых производится добыча рудных полезных ископаемых открытым способом, оборудованы автоматизированными системами управления горнотранспортными комплексами. В рамках даже самой устаревшей из них входит модуль создания, хранения и обработки отчетов по простоям вызванным отказами объектов. Что позволяет использовать первую модель даже на предприятиях со сравнительно вложениями в цифровизацию производственных процессов [90].

В пользу выбор первой модели также говорит то, что в настоящий момент, за исключением электромеханического оборудования машин, на предприятиях горной отрасли в рамках применения систем удаленного мониторинга «Wenco», «Minestar», «VIMS», «Карьер» и др. непрерывный мониторинг технического состояния узлов и элементов карьерных автосамосвалов встречается довольно редко в связи необходимостью высоких капитальных вложений в оборудование и программное обеспечение интеллектуальных систем, стоимость которого может исчисляться сотнями миллионами рублей [87].

Зачастую подвергнутые мониторингу параметры ограничиваются лишь теми, которые перечень которых сформировали инженерно-технические службы предприятия, чаще всего это именно те, которые позволяют отслеживать критерии эффективности эксплуатации карьерных автосамосвалов, например величинах: преодолеваемого расстояния за смену, загрузки кузова, текущей

скорости движения, выполненных рейсов за смену и так далее. При таком подходе многие возможные для удаленного мониторинга параметры остаются незадействованными.

В силу обозначенного выше, для дальнейшего обоснования будет выбрана модель технического обслуживания элементов подвески карьерных автосамосвалов, базирующееся на основе статического анализа причин и периодичности их отказов

3.2.1 Установление закона распределения отказов подвесок по их наработке до отказа

Ввиду того, что наработка между отказами подвесок карьерных автосамосвалов относится к категории непрерывных случайных величин, то есть является переменной, которая в результате испытания в зависимости от случая принимает одно из возможного множества своих значений. Согласно имеющейся ретроспективной информации об отказах узлов автосамосвалах, следует установить закон распределения отказов подвесок карьерных автосамосвалов.

На основе анализа статистики об отказах узлов автосамосвалов БЕЛАЗ-7530 Качканарского ГОКа за обозначенный выше период была построена диаграмма распределения наработки между отказами подвесок (рисунок 3.9), на которой количество указывалось количество отказов в каждом из интервалов, равном 10 часам.



Рисунок 3.9 – Гистограмма распределения отказов подвески автосамосвалов модели БЕЛАЗ-7530 на Качканарском ГОКе (составлено автором)

Аналогично были построены диаграммы для той же модели автосамосвала, эксплуатируемых на Ковдорском ГОКе (рисунок 3.10), и для модели БЕЛАЗ-7513 на обоих предприятиях (рисунки 3.11 и 3.12).

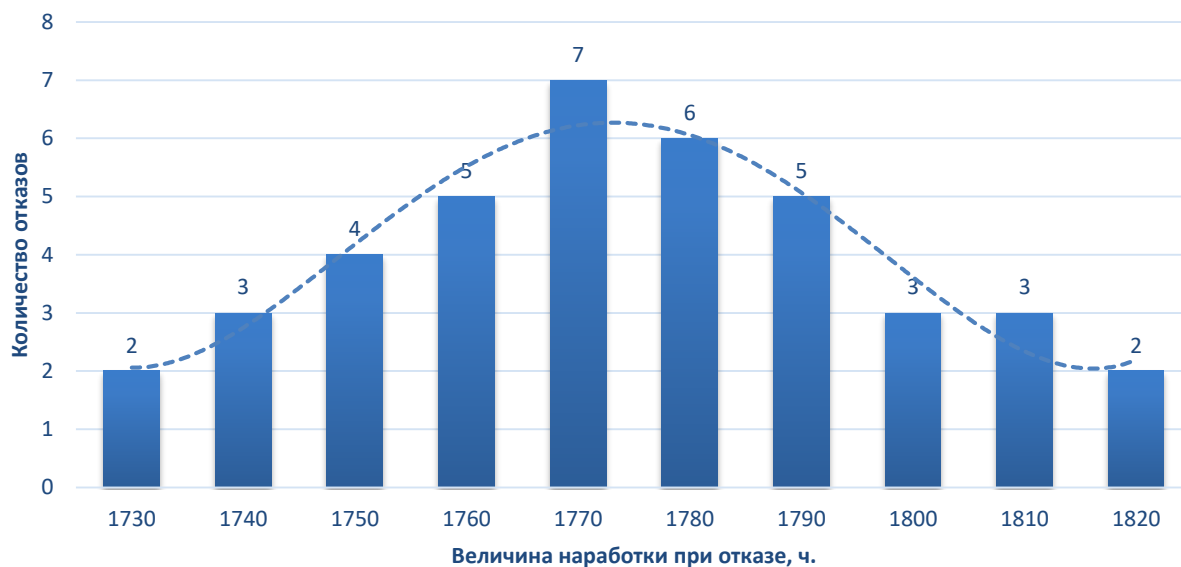


Рисунок 3.10 – Гистограмма распределения отказов подвески автосамосвалов модели БЕЛАЗ-7530 на Ковдорском ГОКе (составлено автором)

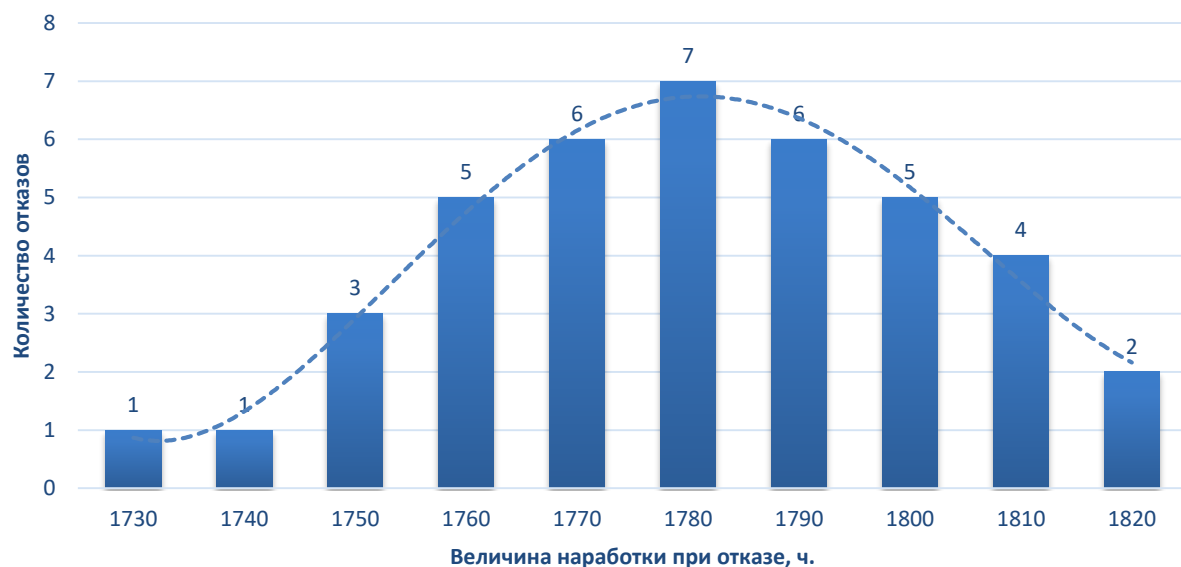


Рисунок 3.11 – Гистограмма распределения отказов подвески автосамосвалов модели БЕЛАЗ-7513 на Качканарском ГОКе (составлено автором)

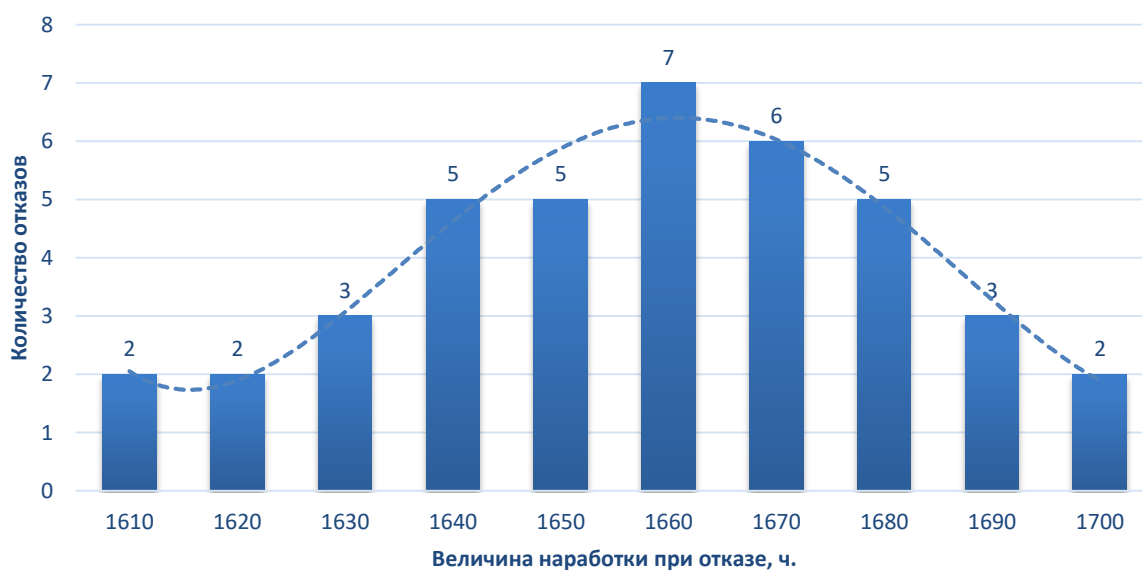


Рисунок 3.12 – Гистограмма распределения отказов подвески автосамосвалов модели БЕЛАЗ-7513 на Ковдорском ГОКе (составлено автором)

На рисунках 3.9–3.12 пунктирной линией показана кривая распределения, отражающая характер статистического распределения отказов. С целью установления закона распределения полученные кривые сопоставлялись с теоретическими (нормальной, логарифмически нормальной, экспоненциальной и Вейбулла). Помимо этого сопоставление также проводилось с помощью критерия согласия Пирсона χ^2 (таблица 3.9).

Таблица 3.9 – Результаты проверки полученных распределений при помощи критерия согласия Пирсона для различных законов распределения (составлено автором)

		Качканарский ГОК		Ковдорский ГОК	
		БЕЛАЗ-7530	БЕЛАЗ-7513	БЕЛАЗ-7530	БЕЛАЗ-7513
Нормальный	χ^2	4,76	2,72	3,51	3,02
	α	0,3	0,5	0,3	0,5
Логарифмический нормальный	χ^2	7,67	5,52	6,51	5,04
	α	0,1	0,2	0,1	0,2
Экспоненциальный	χ^2	2584,73	2417,1	2361,73	2258,01
	α	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Распределение Вейбулла	χ^2	17418,17	21537,17	18700,17	22198,07
	α	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

Как видно из таблицы 3.9, распределение потока отказов по времени подвесок карьерных автосамосвалов обеих моделей на двух предприятиях

является наиболее близким к нормальному. В литературе отмечалось [47], что для узлов, отказы которых вызваны износом их составных элементов, характерен нормальный закон распределения, что подтверждает полученный вывод. Для нормального закона распределения плотность вероятности устанавливается исходя из выражения (3.2) [18]:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(T_{нi}-T_{н\text{ср}})^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.2)$$

где σ – среднее квадратичное отклонение;

a – математическое ожидание предельного изменения случайной величины;

$T_{нi}$ – наработка до i -ого отказа подвески, ч.;

$T_{н\text{ср}}$ – средняя наработка до отказа подвески, ч.

В рамках рассматриваемой задачи при нормальном законе распределения случайной величины математического ожидания принимается равной среднему арифметическому $T_{н\text{ср}}$, таким образом, получим выражение (3.3):

$$A = T_{н\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{нi}}{n}, \quad (3.3)$$

где n – число отказов подвески, ед.

Среднее квадратичное значение наработки до отказа рассматриваемого узла будет устанавливаться исходя из выражения (3.4) [18]:

$$\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{нi} - T_{н\text{ср}})^2}{n-1}} \quad (3.4)$$

3.2.2 Учет планово-экономических показателей при обосновании критерия рационализации межремонтного периода

Так как в основе обосновываемого метода лежит стохастическая модель информационного обеспечения, при выбранном предприятиями превентивном характере осуществляемых мероприятий (т.е. ТОиР с плановыми и аварийными ремонтами узла) ключевым недостатком, в сравнении с эксплуатацией до отказа и проведением только аварийных ремонтов, становятся значительные затраты на проведение ТОиР обусловленные не израсходованным до максимума ресурсом подвесок [47, 91]. Именно поэтому ключевой задачей становится поиск

рационального соотношения между затратами на обеспечение требуемого уровня безотказности подвески $P_{тр}$ и вероятностью безотказной работы этого узла [91]. Следовательно, возникает необходимость установления каждого из видов затрат. Выбранный метод обслуживания включает в себя аварийные и плановые ремонты [16]. Таким образом, средние затраты, связанные с аварийным ремонтом подвески будут определяться согласно выражению (3.5):

$$A_{ав} = \beta_3 + \varepsilon_1 t_3 + \varepsilon_2, \quad (3.5)$$

где β_3 – средние затраты на восстановление работоспособности объекта после его отказа, руб.;

ε_1 – средний ущерб в единицу времени простоя, руб./ч.;

t_3 – средняя продолжительность аварийного ремонта, ч.;

ε_2 – средний ущерб от отказа объекта, руб..

Средние затраты, связанные с проведением одного планового ремонта подвески будут определяться при помощи выражения (3.6):

$$A_{пл} = \beta_1 + \varepsilon_1 t_1, \quad (3.6)$$

где β_1 – средние затраты на проведение планового ремонта, руб.;

t_1 – средняя продолжительность планового ремонта, ч..

Ввиду того, что техника эксплуатируется в осложненных горнотехнических условиях, пренебрежение операциями по снижению их влияния на надежность машин, может привести к значительным экономическим потерям предприятия. Следовательно, следует учесть еще один вид затрат, связанный со снижением влияния группы параметров технологической трассы транспортирования на срок службы подвесок.

Средние затраты на проведение мероприятий по поддержанию установленного макропрофиля участков технологической трассы. Примем то, что при их проведении невозможно движение транспортной техники по реконструируемому участку. Таким образом, средние затраты на проведение мероприятий по поддержанию установленного макропрофиля участков технологической трассы будут определяться при помощи выражения (3.7):

$$A_{\text{геом}} = \beta_2 + \varepsilon_1 t_2, \quad (3.7)$$

где β_2 – средние затраты на проведение реконструкции участка, руб.;

t_2 – средняя продолжительность проведения работ по реконструкции участка, ч.

3.2.3 Учет применяемой предприятиями стратегии обслуживания и ремонта узлов автосамосвалов

Обозначим $P_{\text{тр}}$ требуемый уровень вероятности безотказной работы подвески за межремонтный период $T_{\text{меж}}$. Следовательно, средняя наработка до отказа подвески будет равна $\int_0^T P(t) dt$. Таким образом, в рамках установления рационального соотношения между затратами трех видов, описанных выше, и требуемым уровнем безотказности подвески можно руководствоваться соотношением рационализации, предложенным А.А. Кулешовым, устанавливаемым согласно выражению (3.8) [47]:

$$\frac{(A_{\text{пл}} + A_{\text{геом}})P_{\text{тр}} + A_{\text{ав}}[1 - P_{\text{тр}}]}{\int_0^{T_{\text{меж}}} P(t) dt} \rightarrow \min \quad (3.8)$$

Обозначим его за критерий рационализации K .

В том случае, если при наработке $T_{\text{меж}}$ будет производиться замена всего узла, то математическое ожидание наработки может быть представлено в виде $\int_0^{T_{\text{меж}}} P(t) dt = \int_0^{T_{\text{меж}}} t f(t) dt + T_{\text{меж}} P(T_{\text{меж}})$. Таким образом, критерий рационализации, установленный в выражении (3.8), примет вид выражения (3.9):

$$K = \frac{(A_{\text{пл}} + A_{\text{геом}})P_{\text{тр}} + A_{\text{ав}}[1 - P_{\text{тр}}]}{\int_0^{T_{\text{меж}}} t f(t) dt + T_{\text{меж}} P_{\text{тр}}} \quad (3.9)$$

Ввиду того, что $A_{\text{ав}}$ является вещественным числом, то справедливо разделить на него выражение (3.9) без потери корней. Таким образом, получим выражение (3.10):

$$\frac{K}{A_{\text{ав}}} = \frac{\frac{(A_{\text{пл}} + A_{\text{геом}})}{A_{\text{ав}}} P_{\text{тр}} + [1 - P_{\text{тр}}]}{\int_0^{T_{\text{меж}}} t f(t) dt + T_{\text{меж}} P_{\text{тр}}}$$

$$\frac{A_{\text{пл}} + A_{\text{геом}}}{A_{\text{ав}}} = \left[\frac{f(t)}{P_{\text{тр}}} \left(P_{\text{тр}} + \int_0^{T_{\text{меж}}} t f(t) dt + T_{\text{меж}} P_{\text{тр}} \right) \right] \left(1 - \frac{A_{\text{пл}} + A_{\text{геом}}}{A_{\text{ав}}} \right) - 1 \quad (3.10)$$

Подставив выражение (3.1) в выражение (3.10) получим выражение (3.11):

$$\frac{A_{пл}+A_{геом}}{A_{ав}} = [P_{тр} + f(t)(T_{ном} - \Delta T)/N] \left(1 - \frac{A_{пл}+A_{геом}}{A_{ав}}\right) - 1, \quad (3.11)$$

где N – число ремонтов до достижения предельного срока службы подвески, ед.

Выразим из него плотность вероятности, таким образом, получим выражение (3.12):

$$f(t) = \frac{(\frac{A_{пл}+A_{геом}}{A_{ав}}+1)/(1-\frac{A_{пл}+A_{геом}}{A_{ав}})-P_{тр}}{(T_{ном}-\Delta T)/N} \quad (3.12)$$

Приравняем выражение (3.11) к выражению плотности вероятности для нормального закона распределения из выражения (3.2). Таким образом, получим выражение (3.13):

$$(T_{меж} - T_{н ср})^2 = -2\sigma^2 \ln\left(\frac{(\frac{A_{пл}+A_{геом}}{A_{ав}}+1)/(1-\frac{A_{пл}+A_{геом}}{A_{ав}})-P_{тр}}{(T_{ном}-\Delta T)/N}\right) \sigma\sqrt{2\pi} \quad (3.13)$$

Таким образом, искомый рациональный межремонтный период будет являться корнем уравнения (3.14):

$$T_{меж} = \frac{2T_{н ср} \pm \sqrt{4T_{н ср}^2 - 4T_{н ср}^2 - 8\sigma^2 \ln\left(\frac{(\frac{A_{пл}+A_{геом}}{A_{ав}}+1)/(1-\frac{A_{пл}+A_{геом}}{A_{ав}})-P_{тр}}{(T_{ном}-\Delta T)/N}\right) \sigma\sqrt{2\pi}}}{2} \quad (3.14)$$

Ввиду того, что вещественных корней у представленного выше выражения может быть 1 или 2. В последнем случае следует брать наименьший, следовательно, для установления рационального межремонтного периода получим выражение (3.15):

$$T_{меж} = T_{н ср} - \sqrt{-2\sigma^2 \ln\left(\frac{(\frac{A_{пл}+A_{геом}}{A_{ав}}+1)/(1-\frac{A_{пл}+A_{геом}}{A_{ав}})-P_{тр}}{(T_{ном}-\Delta T)/N}\right) \sigma\sqrt{2\pi}} \quad (3.15)$$

Согласно правилу «трех сигм», утверждающему о том, что для любой случайной величины, обладающей конечной дисперсией, вероятность того, что случайная величина отклонится от своего математического ожидания не менее, чем на три среднеквадратических отклонения, составляет не более 1/9 (рисунок 3.13) [18], вероятность нахождения рационального межремонтного периода подвески карьерного автосамосвала в диапазоне одного среднеквадратического отклонения от средней величины наработки на отказ составляет 0,682, в

диапазоне двух среднеквадратичных отклонений – 0,954, в диапазоне трех – 0,997.

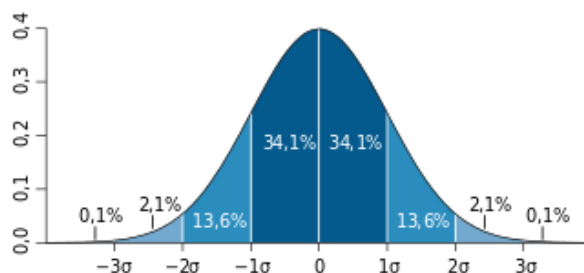


Рисунок 3.13 – Визуализация закона «трех сигм» [18]

3.2.4 Установление ряда значений рационального межремонтного периода подвесок для парка карьерных автосамосвалов, участвующего в исследовании

С целью апробации полученного выражения (3.15), были произведены расчеты рационального межремонтного периода подвесок карьерных автосамосвалов для диапазона значений требуемого уровня вероятности безотказной работы подвески $[0,6; 0,95]$ и удельных затрат на проведение мероприятий по поддержанию этого уровня $\frac{A_{пл} + A_{геом}}{A_{ав}}$ в диапазоне $[0,45; 0,8]$. Для рассматриваемого парка машин были получены графики зависимостей (рисунки 3.14 - 3.17).

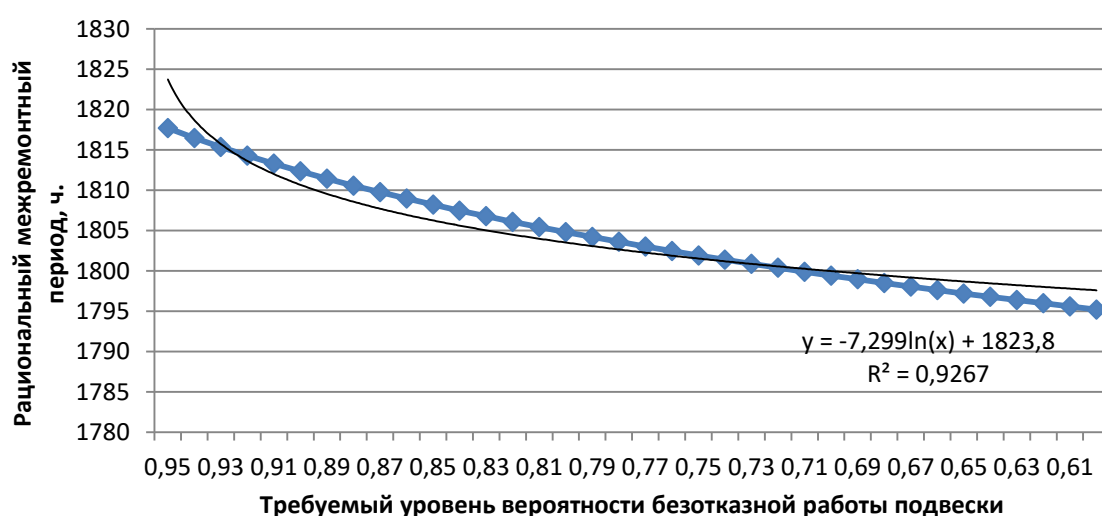


Рисунок 3.14 – Зависимость установленного рационального межремонтного периода подвесок карьерных автосамосвалов от заданной вероятности безотказной работы для автосамосвалов БЕЛАЗ-7530 Качканарского ГОКа

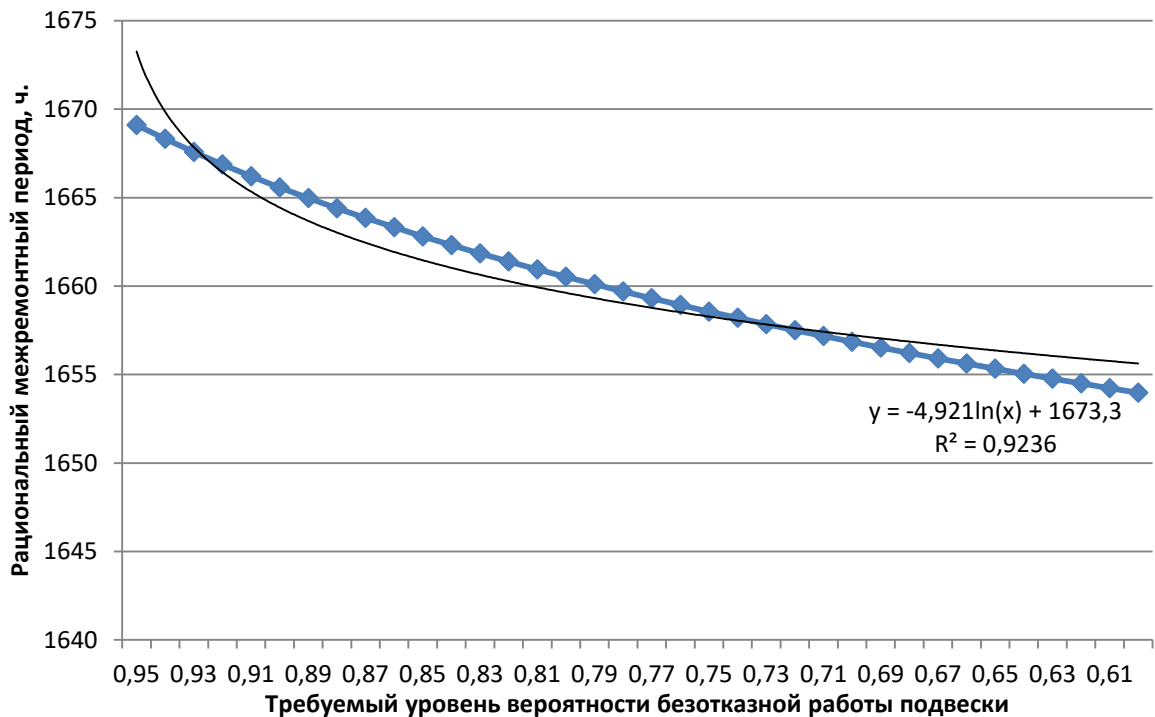


Рисунок 3.15 – Зависимость установленного рационального межремонтного периода подвесок карьерных автосамосвалов от заданной вероятности безотказной работы для автосамосвалов БЕЛАЗ-7530 Ковдорского ГОКа

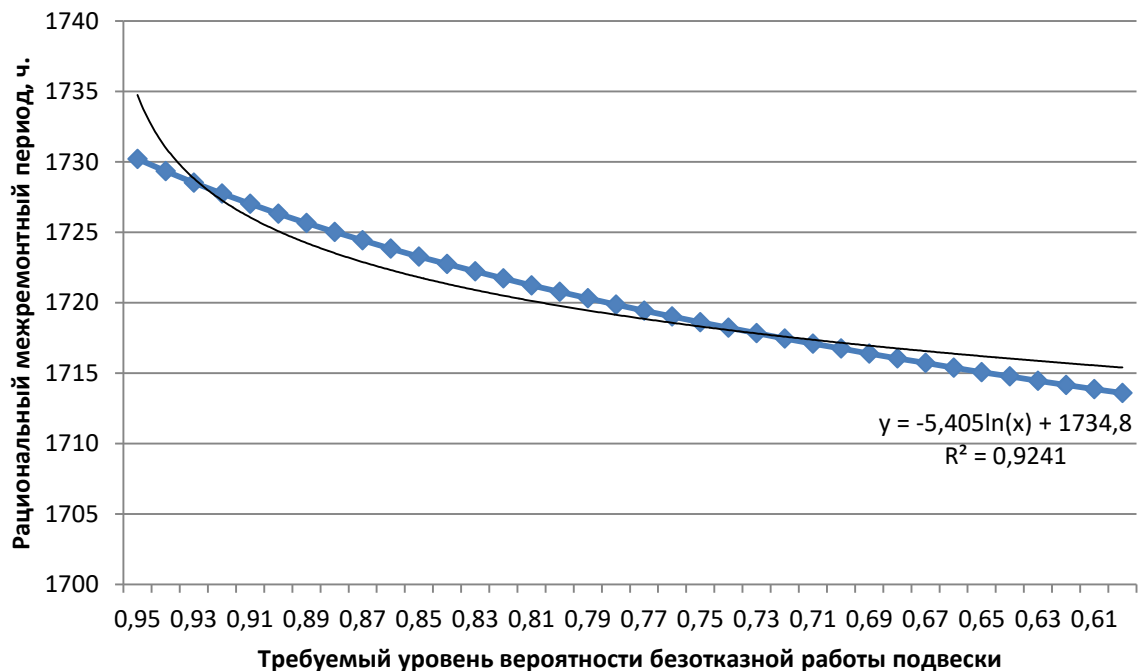


Рисунок 3.16 – Зависимость установленного рационального межремонтного периода подвесок карьерных автосамосвалов от заданной вероятности безотказной работы для автосамосвалов БЕЛАЗ-7513 Качканарского ГОКа

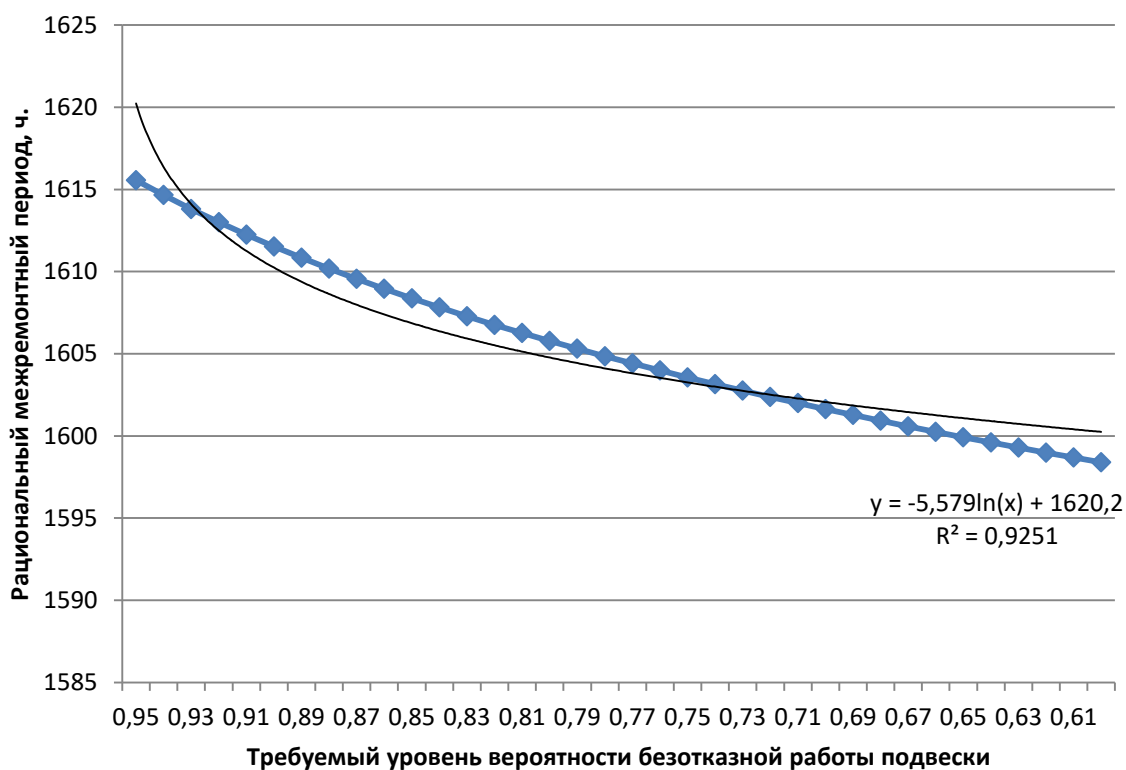


Рисунок 3.17 – Зависимость установленного рационального периода подвесок карьерных автосамосвалов от заданной вероятности безотказной работы для автосамосвалов БЕЛАЗ-7513 Ковдорского ГОКа

Как следует из рисунков 3.14 – 3.17 зависимость рационального межремонтного периода от требуемого уровня вероятности безотказной работы подвески наиболее точно описывается убывающей логарифмической функцией, о чем свидетельствует высокие (больше 0,92) значения коэффициента детерминации. Для каждой из рассматриваемых моделей автосамосвалов в условиях обоих предприятий полученный ряд значений рационального межремонтного периода подвесок карьерных автосамосвалов составил от 1601 до 1815 ч.

Таким образом, ремонтно-механические службы горных предприятий и компании, предоставляющие услуги сервиса горной техники, выбрав приемлемый для них уровень затрат и задавая требуемый уровень безотказной работы рассматриваемого узла, смогут определить рациональный межремонтный период подвесок карьерных автосамосвалов при разработке комплекса мероприятий по

поддержанию работоспособного состояния этих машин в рамках обоснования регламента их ремонтных работ.

3.3 Выводы по Главе 3

На основании анализа данных, полученных с двух предприятий по добыче железной руды со схожими горно-геологическими и климатическими условиями при помощи трехфакторного регрессионного анализа была установлена эмпирическая зависимость между сокращением срока службы подвески карьерных автосамосвалов и группой параметров технологических трасс транспортирования горной массы, обусловленных осложненными горнотехническими условиями.

Распределение потока отказов подвесок карьерных автосамосвалов БЕЛАЗ-7513 и БЕЛАЗ-7530 эксплуатируемых на Ковдорском и Качканарском ГОКа по величине их наработки до отказа наиболее близко к нормальному закону распределения случайных величин, что доказывается тем, что рассчитанные значения критерия согласия Пирсона больше критических.

Сформулированный критерий рационализации межремонтного периода для подвесок карьерных автосамосвалов согласно применяемой предприятиями стратегии по поддержанию установленного уровня их надежности (ТОиР с плановыми и аварийными ремонтами) отражает стохастический характер наработки между отказами рассматриваемого узла, ряд планово-экономических показателей и требуемый уровень вероятности безотказной работы подвески. Для значений требуемого уровня вероятности безотказной работы $[0,6; 0,95]$ и удельных затрат на проведение мероприятий по поддержанию этого уровня $\frac{A_{пл} + A_{геом}}{A_{ав}}$ в диапазоне $[0,45; 0,8]$ для каждой из рассматриваемых моделей автосамосвалов в условиях обоих предприятий ряд значений рационального межремонтного периода подвесок карьерных автосамосвалов составил от 1601 до 1815 ч.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА И ОПРОБОВАНИЕ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО МЕЖРЕМОНТНОГО ПЕРИОДА ПОДВЕСОК КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ

4.1 Связь длительности аварийного ремонта подвесок с их межремонтным периодом

В современной горной промышленности в качестве одного из ключевых показателей эффективности функционирования карьерных автосамосвалов принимают величину их эксплуатационной надежности, служащую критерием стабильной работы техники, обеспечивая достижение предъявляемых эксплуатационных показателей [71]. С целью обеспечения установленного уровня надежности техники была разработана система технического обслуживания и ремонтов, нашедшая широкое применение на предприятиях горной отрасли РФ [27] благодаря высокому обеспечиваемому уровню надежности горной техники [36].

Согласно ей, для каждого узла горной машины, для которого рационально проводить мероприятия по восстановлению работоспособности, а не подвергать отказавших узел замене, ремонтными службами предприятия устанавливается межремонтный период с целью заблаговременной подготовки необходимого оборудования и материалов, требуемых для проведения необходимых ремонтных работ отказавшего узла.

Зачастую, обладая информацией об отказах однотипных объектов, руководством механической службы ГОКа принимается решение о принятии срока замены узла или межремонтного периода равного его средней наработке до отказа [19], что применяется на обоих рассматриваемых предприятиях. Не смотря на то, что такой подход позволяет оценить фактический срок службы с большей точностью в сравнении с его нормативным сроком службы, тем не менее, в силу вероятностного характера величины фактического срока службы, после отказа узла возникают дополнительные простои, обусловленные ожиданием поставки необходимой запчасты, отсутствием свободного персонала и т.д. Так, для

рассматриваемых в исследовании автосамосвалов за период 2020-2022, лишь при 10% отказов подвески карьерных автосамосвалов средняя продолжительность аварийного ремонта исключала простои, т.е. была равна сумме продолжительности обнаружения отказа и времени ремонта узла (рисунок 4.1). При этом наибольшая величина продолжительности простоев приходится на диапазон наработок до отказа от минимальной $T_{н\ min}$, ч. до 90% от средней $T_{н\ ср.}$, ч. ввиду значительной составляющей времени ожидания запчастей, необходимых для проведения ремонтных работ, а также ожидания места для проведения ремонта, т.е. логистических простоев (рисунок 4.2).

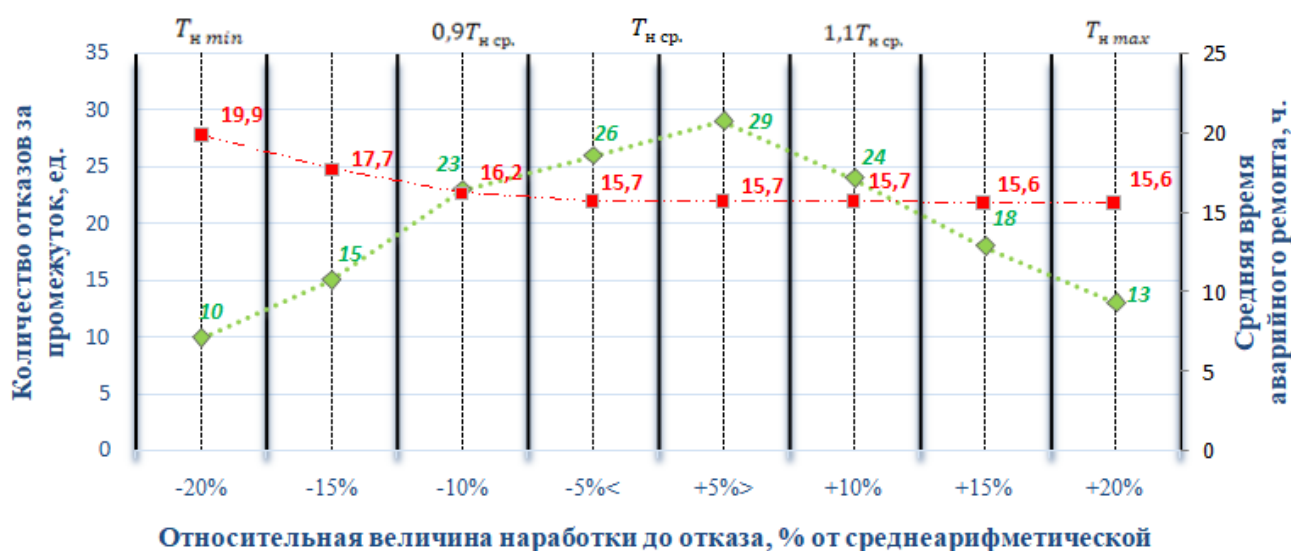


Рисунок 4.1 – Распределение числа отказов и среднего времени ремонта подвесок от величины наработки при отказе за 2020-2022 гг. (составлено автором)

Однако, для диапазона наработки до отказа от 90% от средней $T_{н\ ср.}$ до максимальной $T_{н\ max}$, ч. почти не изменяется среднее время аварийного ремонта подвески (рисунок 4.2), в том числе как длительность простоев различных видов, что обуславливается наличием необходимых запчастей, места для ремонта и т.д., и тем самым свидетельствует о готовности ремонтной службы к ликвидации предстоящего отказа.

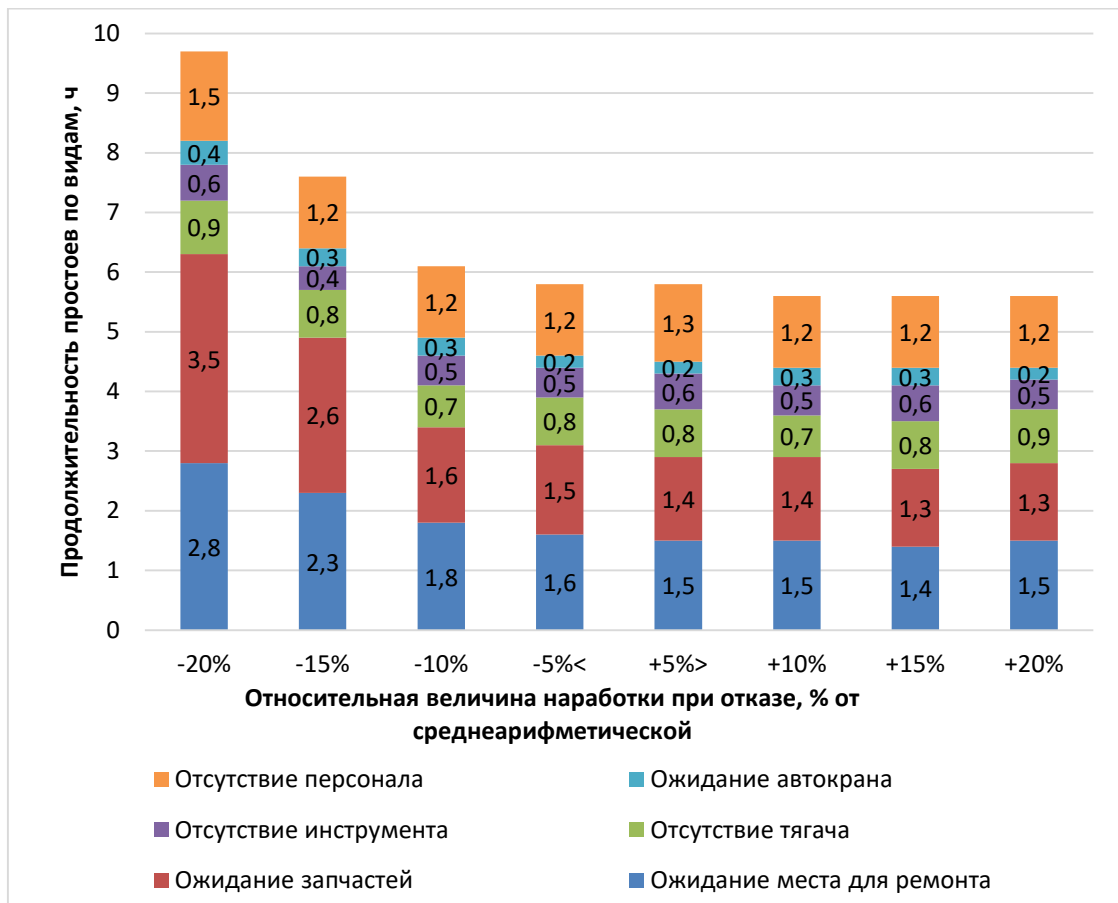


Рисунок 4.2 – Диаграмма удельного веса каждой из причин возникновения простоев вследствие отказа подвески за 2020-2022гг. (составлено автором)

Таким образом, при обосновании рационального периода подвесок карьерных автосамосвалов критерием применимости установленного значения следует считать сокращение величины логистических простоев вследствие отказа рассматриваемого узла.

4.2 Алгоритм определения рационального межремонтного периода подвесок карьерных автосамосвалов

Согласно установленной ранее зависимости сокращения срока службы подвесок карьерных автосамосвалов от группы параметров технологических трасс транспортирования горной массы (3.1) и расчетной формуле для их рационального межремонтного периода (3.15) был создан алгоритм [72] определения рационального межремонтного периода подвесок карьерных автосамосвалов, структура которого представлена на рисунке 4.3 и включающий в себя следующие пункты:

1. Установление межремонтного периода и номинального срока службы подвесок автосамосвалов для базовых условий эксплуатации согласно заводскому графику ремонтных работ;

2. Учет и анализ параметров трассы транспортирования горной массы, на которой задействован карьерный автосамосвал. Разбиение маршрута на отдельные участки с характерными геометрическими параметрами (продольный и поперечный уклон, длины поворота и т.д.), установление их числа и длины согласно показаниям системы удаленного мониторинга давления в цилиндрах подвески;

3. Анализ «флуктуаций» давления на каждом из участков согласно показаниям системы удаленного мониторинга технического состояния автосамосвала (продолжительности «флуктуаций», пикового значения давления в цилиндрах подвески) и системы позиционирования техники (скорости движения автосамосвала) на таком участке, установление их числа и протяженности);

4. Расчет факторов, влияющих на сокращение срока службы подвесок, входящих в группу параметров технологических трасс транспортирования и установление величины сокращения их срока службы;

5. Оценка статистических показателей потока отказов подвески автосамосвалов согласно статистической информации об отказах рассматриваемого узла: математическое ожидание наработки до отказа, Среднеквадратичное отклонение наработки до отказа и плотность вероятности потока отказов;

6. Задание требуемого уровня безотказности подвески узла и средних затрат на проведение дорожных работ, планового и аварийного ремонтов подвесок;

7. Установление величины рационального межремонтного периода подвесок карьерных автосамосвалов;

8. Корректировка периодичности ремонтных работ подвесок автосамосвалов, подготовка необходимой ремонтной базы (места для проведения ремонта, персонала и т.п.) перед ожидаемым отказом подвески с целью

сокращения величины логистических простоев, возникшим вследствие произошедшего отказа.

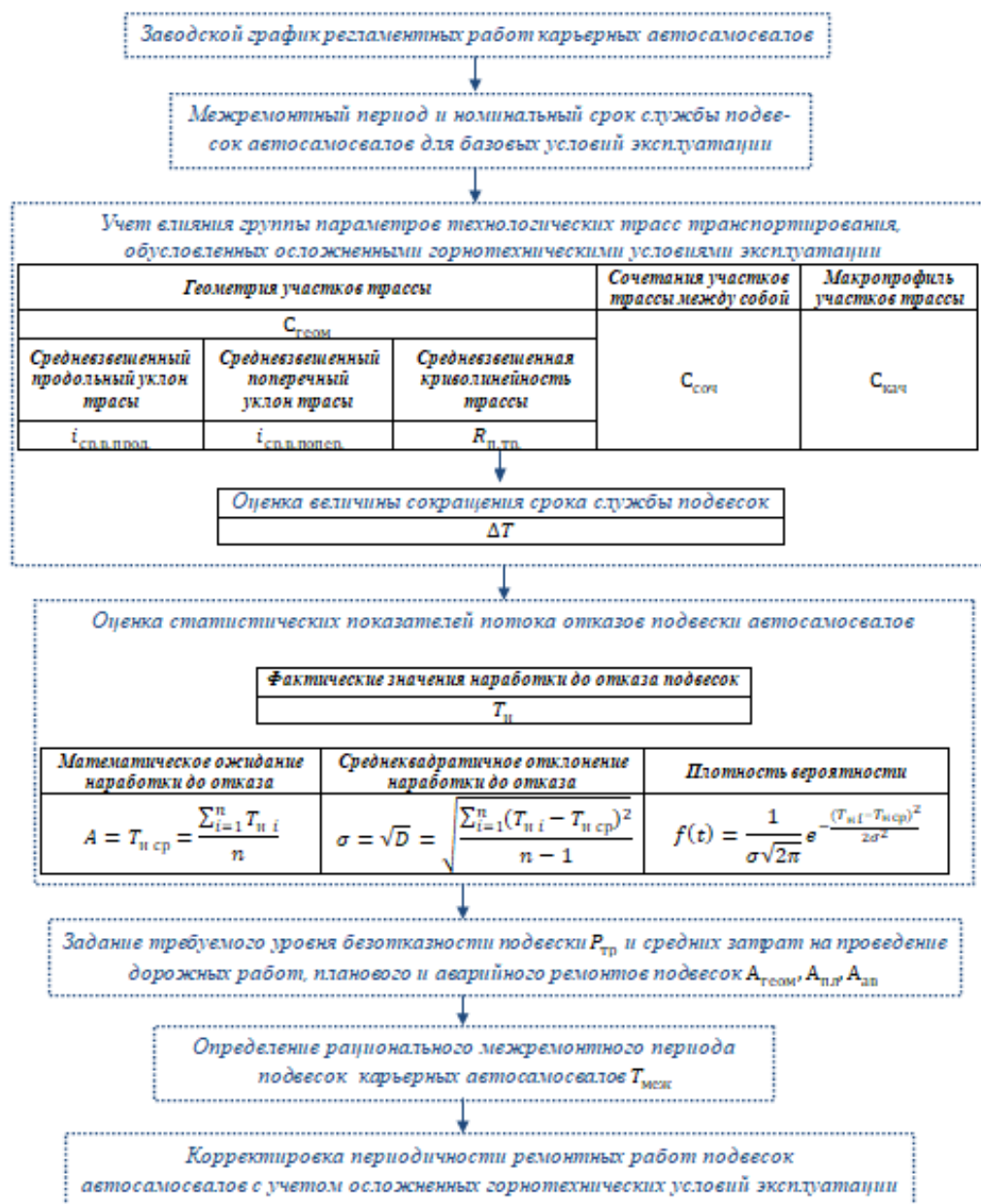


Рисунок 4.3 – Структура алгоритма определения рационального межремонтного периода подвесок карьерных автосамосвалов, эксплуатирующихся в осложненных горнотехнических условиях (составлено автором)

На основании обоснованного алгоритма на языке Java была разработана прикладная программа для ЭВМ [72]., позволяющая при задании параметров трассы транспортирования и назначенного срока службы узла определить величину рационального межремонтного периода.

4.3 Результаты применения предлагаемого алгоритма при обосновании мероприятий по поддержанию установленного уровня надежности

Произведем опробование предлагаемого алгоритма для автосамосвалов, задействованных на маршрутах, представленных в таблице 3.5. Согласно предложенного алгоритму, для рассматриваемых предприятий за 2023 г., были получены значения рационального межремонтного периода, представленные в таблице 4.1, для автосамосвалов, задействованных для транспортирования горной массы на каждом из рассматриваемых маршрутов.

Таблица 4.1 – Полученные в результате использования предложенного алгоритма значения рациональный межремонтный период для каждого из рассматриваемых автосамосвалов (составлено автором)

ГОК	Номер маршрута	Количество самосвалов на маршруте, ед.	Рациональный межремонтный период, ч.
Ковдорский	1	2	1923
	2	4	1899
	3	2	1825
	4	3	1819
	5	6	1658
Качканарский	6	5	1747
	7	2	1788
	8	2	1609
	9	7	1705

Таким образом, при обосновании регламентов технического обслуживания и ремонта подвесок карьерных автосамосвалов выбор значения межремонтного интервала для их подвесок, равному представленному в таблице 4.1, при сравнении с фактическими значениями простоев за 2023 год, полученных исходя из анализа журналов ремонтных служб предприятий, позволяет получить значения продолжительности ремонтных работ $T_{\text{рем}}, \text{ч.}$ меньшие, чем те, что фигурируют в рассматриваемых документах (таблица 4.2), что объясняется сокращением величины логистических простоев $T_{\text{пр.лог.}}, \text{ч.}$ (рисунок 4.4).

Таблица 4.2 – Сравнение продолжительности аварийного ремонта и логистических простоев при использовании предлагаемого алгоритма в сравнении с фактическим за 2023 г. (составлено автором)

Номер маршрута	Продолжительность логистических простоев $T_{\text{пр.лог.}}$, ч.		Длительность аварийного ремонта $T_{\text{рем}}$, ч.	
	Фактическая	Расчетная	Фактическая	Расчетная
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

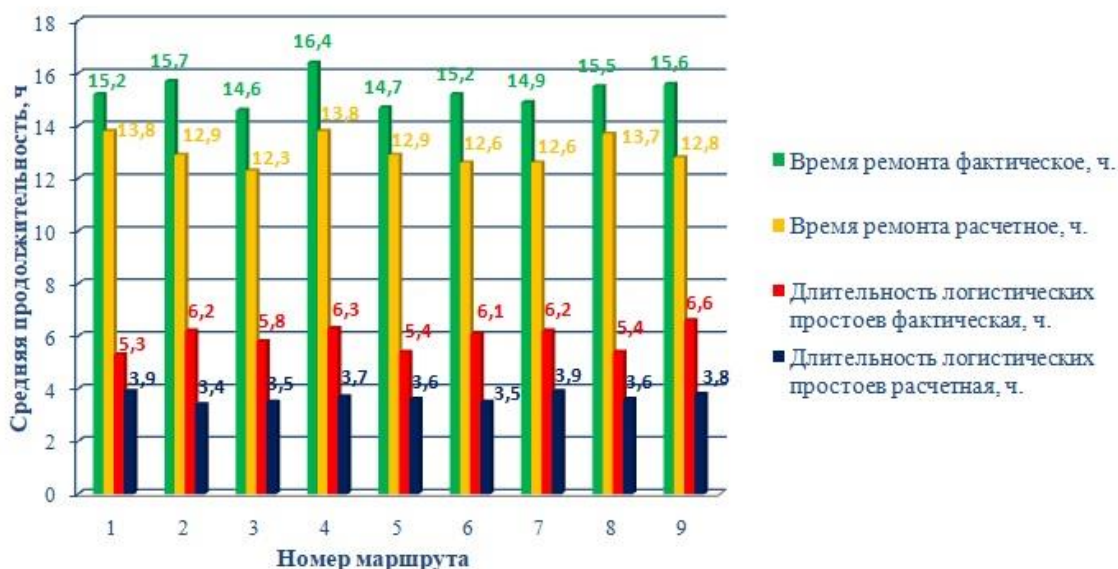


Рисунок 4.4 – Сравнение фактической продолжительности логистических простоев и аварийного ремонта подвесок автосамосвалов, задействованных на выбранных маршрутах, за 2023 г. с рассчитанным при помощи разработанного алгоритма (составлено автором)

Как видно из рисунка 4.4, при использовании разработанного алгоритма средняя продолжительность логистических простоев при аварийном ремонте подвески автосамосвалов, эксплуатируемых в осложненных горнотехнических условиях, сократилась на 45 %, а среднее время аварийного ремонта – на 14%.

Таким образом, справедливо утверждать, что периодичность проведения ремонтных работ подвесок карьерных автосамосвалов, эксплуатируемых на предприятиях с осложненными горнотехническими условиями, следует корректировать при помощи разработанного алгоритма.

В качестве графической иллюстрации разработанного алгоритма было проведено сравнение графиков ремонтов подвесок карьерных автосамосвалов согласно рекомендациям завода-изготовителя, основанного на базовых (неосложненных) условиях эксплуатации, фактического и предлагаемого для автосамосвалов, эксплуатируемых на маршруте №9. (рисунок 4.5).

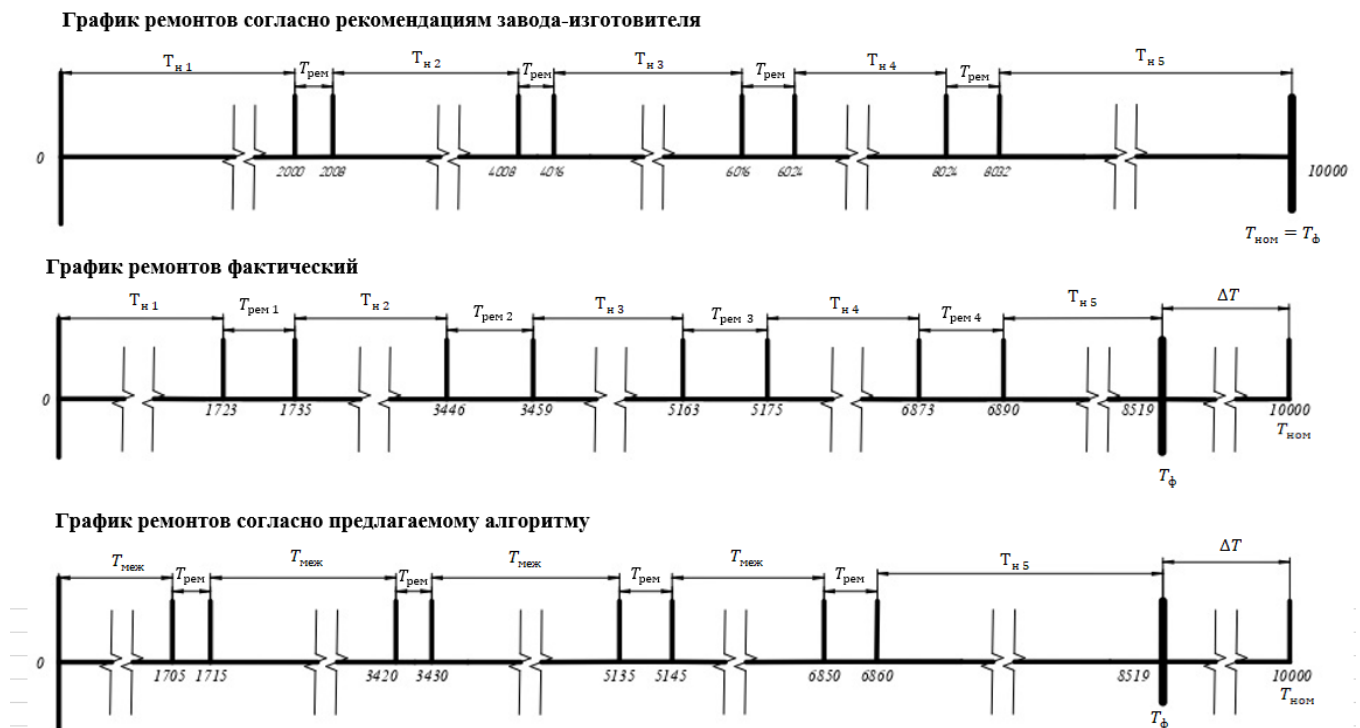


Рисунок 4.5 – Графическое сопоставление регламентного, фактического и предлагаемого графиков ремонтов подвесок автосамосвалов, задействованных на маршруте №9 (составлено автором)

Для расчета экономического эффекта, достигаемого при применении предлагаемого алгоритма, следует установить экономические потери при одном часе простоя карьерных автосамосвалов [61].

Для определения экономических потерь от одного часа простоя транспортной техники следует принять во внимание тот факт, согласно ключевым представлениям экономической теории, суммарные потери будут складываться из

разности упущенной выгоды (потенциальный упущенный доход D) за 1 час простоя и расходов на транспортирование (P), которые потенциально могли быть понесены за 1 моточас функционирования автосамосвала, согласно выражению (4.1):

$$P_{1\text{ ч}} = D - P, \quad (4.1)$$

где $P_{1\text{ ч}}$ – потери от одного часа простоя автосамосвала, руб.;

D – потери, связанные с недополученным доходом от одного часа простоя автосамосвала, руб.;

P – расходы на транспортирование в течение одного моточаса для одного автосамосвала, руб.;

Расходы на транспортирование будут включать в себя следующие составляющие, учтенные в выражении (4.2):

$$P = \frac{C_{\text{тр-ния 1 т км}} \cdot A_{\text{год}}}{N_{\text{раб в год}} - N_{\text{пр}}} \cdot K, \quad (4.2)$$

где $N_{\text{пр}}$ – количество часов простоя самосвала за год, шт;

$C_{\text{тр-ния 1 т км}}$ – стоимость перевозки 1 т км, руб./т км;

$A_{\text{год}}$ – годовой объем грузоперевозок, осуществленных одним автосамосвалом, т км;

$N_{\text{раб в год}}$ – число рабочих моточасов за год, шт;

K – коэффициент, отражающих удельный вес расходов, не связанных с непосредственным производством готовой продукции, в структуре себестоимости продажи полезного ископаемого.

При анализе бухгалтерской отчетности горных предприятий было установлено, что расходы, не связанные напрямую с объемом добычи полезного ископаемого (коммерческие и управленческие расходы) составляют в среднем за рассматриваемый период примерно 52% [21, 22] от себестоимости продаж конечной продукции (рисунок 4.6).

Наименование показателя	Код	2021
Выручка	2110	77 679 925
Себестоимость продаж	2120	(21 877 236)
Валовая прибыль (убыток)	2100	55 802 689
Коммерческие расходы	2210	(7 832 489)
Управленческие расходы	2220	(3 574 029)
Прибыль (убыток) от продаж	2200	44 396 171

Рисунок 4.6 – Фрагмент бухгалтерского отчета за 2021 г. [21]

Таким образом, получим $K=0,48$. Следовательно, выражение (4.2) возможно преобразовать в выражение (4.3) [25]:

$$P = 0,48 \frac{C_{\text{тр-ния 1 т км}} \cdot A_{\text{год}}}{N_{\text{раб в год}} - N_{\text{пр}}} \quad (4.3)$$

Потенциальный упущенный доход будет включать в себя следующие составляющие согласно выражению (4.4) [25]:

$$D = C_{1\text{т руды}} \cdot Q_{\text{руд 1 ч}} \cdot \gamma, \quad (4.4)$$

где $C_{1\text{т руды}}$ – стоимость продажи 1 тонны руды, руб.;

$Q_{\text{руд 1 мч}}$ – средний объем перевезённой руды за 1 час, м³/ч;

γ – плотность руды, т/м³.

Ввиду того, что автосамосвалами осуществляется транспортирование не только руды, но и вскрышных породы, то целесообразно учесть коэффициент вскрыши, согласно выражению (4.5) [25]:

$$D = N_{\text{пр}} C_{1\text{т руды}} \frac{Q_{\text{г.м.за 1 ч}}}{K_{\text{вск}}} K_{\text{дол}}, \quad (4.5)$$

где $Q_{\text{г.м.за 1 мч}}$ – объем перевезённой автосамосвалом горной массы за 1 час, м³;

$K_{\text{вск}}$ – коэффициент вскрыши;

$K_{\text{дол}}$ – доля выручки, формируемая автосамосвалами.

В связи с тем, что автосамосвалы являются не единственным элементом технологической цепочки, формирующей выручку, их доля от итоговой выручки составит 10% [110], т.е. $K_{\text{дол}} = 0,1$. Таким образом, получим выражение (4.6) [25]:

$$D = 0,1N_{\text{пр}}C_{1\text{т руды}} \frac{Q_{\text{г.м.за 1 ч}}}{K_{\text{вск}}} \quad (4.6)$$

Следовательно, потери от одного часа простоя одного автосамосвала при дальнейших расчетах будут определяться исходя из формулы (4.7) [25]:

$$П_{1 \text{ мч}} = 0,1N_{\text{пр}}C_{1\text{т руды}} \frac{Q_{\text{г.м.за 1 ч}}}{K_{\text{вск}}} - 0,48 \frac{C_{\text{тр-ния 1т км}} \cdot A_{\text{год}}}{N_{\text{раб в год}} - N_{\text{пр}}} \quad (4.7)$$

С целью установления экономических потерь от одного часа простоя карьерных автосамосвалов следует произвести расчет с согласно информации в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Исходные данные по предприятиям, используемые при расчете экономических потерь от часа простоя карьерного автосамосвала (составлено автором)

Показатель	Ковдорский ГОК	Качканарский ГОК
Среднегодовой объем извлеченной железной руды $A_{\text{год}}$, т/год	11,4	60,3
Коэффициент вскрыши	1,75	0,4
Средний объем горной массы, перевозимый одним самосвалом за 1 час $Q_{\text{г.м. за 1 ч}}$, м ³ /ч	99,67	168,81
Стоимость транспортирования 1 м ³ горной массы $C_{\text{тр-ния 1 т км}}$, руб./м ³	9,63	5,47
Число рабочих часов в год $N_{\text{раб в год}}$, ч.	8688	

Используя выражения 4.1 – 4.6 экономические потери от одного часа простоя карьерного автосамосвала, задействованного для транспортирования железной руды, для Ковдорского ГОКа составили приблизительно 106,9 тыс.руб., а для Качканарского – 191,2 тыс.руб. Следовательно, при числе отказов подвески за 2023 для Ковдорского ГОКа равном 46 и для Качканарского – 50, экономический эффект при проведении комплекса мероприятий, направленного на поддержание установленного уровня надежности карьерных автосамосвалов с межремонтным периодом подвесок, устанавливаемом согласно предлагаемому алгоритму, достигает 10,7 млн. руб. для Ковдорского ГОКа и 22,7 млн. руб. для Качканарского ГОКа.

4.4 Выводы по Главе 4

В результате работы над четвертой главой диссертации были сделаны следующие выводы:

1. В ходе анализа журналов сервисных служб предприятий, в которых их работниками фиксировались причины и продолжительности простоев карьерных автосамосвалов, в том числе после отказов подвески, установлено, что лишь для 10% из них аварийный ремонт вследствие отказа подвески исключал логистические простои, вызванных отсутствием необходимого места и ожиданием запчастей.

2. При сопоставлении величин наработки до отказа подвески и продолжительности последовавших аварийных ремонтов наибольшее значение последних приходится на диапазон наработок до отказа от минимальной до 90% от средней, что обуславливалось значительной составляющей величины логистических простоев, а именно: ожидания запчастей, необходимых для проведения ремонтных работ, а также ожидания места для проведения ремонта.

3. На основании установленных в предыдущей главе зависимостей, разработан алгоритм определения рационального межремонтного периода подвесок карьерных автосамосвалов, эксплуатируемых в осложненных горнотехнических условиях. Его опробование на основе данных 2023 года в сравнении с фактическими показал, что для выбранных предприятий, проводящих отработку месторождений твердых полезных ископаемых согласно углубочной кольцевой системе разработки, его применение позволило сократить среднюю продолжительность логистических простоев на 45%, а среднее время аварийного ремонта рассматриваемого узла – на 14%, что позволяет рекомендовать корректировку периодичности проведения ремонтных работ подвесок карьерных автосамосвалов, эксплуатируемых на предприятиях с осложненными горнотехническими условиями, при помощи разработанного алгоритма.

4. Согласно методике расчета экономических потерь от одного часа простоя карьерных автосамосвалов, установлено, что искомое значение для Ковдорского ГОКа составило ориентировочно 106,9 тыс.руб., а для Качканарского – 191,2 тыс.руб. Таким образом, ожидаемый экономический эффект при проведении комплекса мероприятий, направленных на поддержание установленного уровня надежности карьерных автосамосвалов с межремонтным периодом подвесок,

определяемого согласно предлагаемому алгоритму, достигает 10,7 млн. руб./год. для Ковдорского ГОКа и 22,7 млн. руб./год. для Качканарского ГОКа .

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, задействованных 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 продолжительности 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация управления горно-транспортным комплексом на карьере «Нюрбинский» АК «АЛРОСА» / Ульянов В.Г., Димант Б.И., Зырянов И.В., Пархоменко В.А., Табакман И.Б., Антоненко Д.П. // Горное оборудование и электромеханика. 2011. №7. С. 39-44.
2. Автосамосвалы на карьерах / Евсеев В. Н., Вареничев А. А. // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2017. № 8. С. 30–36
3. Анализ методики выбора модели автосамосвала на предприятиях горной отрасли / **Ботян Е. Ю.**, Пушкарев А. Е. // Сборник научных трудов, посвященный 85-летию кафедры ЭАТиС МАДИ, по материалам 79-й научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, 2021. С. 213–216.
4. Андреева, Л. И. Исследование эксплуатационной надежности карьерных автосамосвалов / Л. И. Андреева, Ю. Ю. Ушаков // Известия Уральского государственного горного университета. – 2016. – № 3(43). – С. 74-77.
5. Андреева, Л. И. Методология формирования системы технического сервиса горно-транспортного оборудования на угледобывающем предприятии: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Людмила Ивановна Андреева ; УГГУ. – Екатеринбург, 2004. – 50 с.
6. Андреева, Л. И. Методы прогнозирования сроков отказа деталей и узлов горной техники / Л. И. Андреева // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XXII международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 04–05 апреля 2024 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2024. – С. 357-363.
7. Андреева, Л. И. Показатели и критерии оценки технического состояния горнотранспортного оборудования / Л. И. Андреева // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XXII международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 04–05 апреля 2024 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2024. – С. 352-356.

8. Анистратов, К. Ю. Мировые тенденции развития структуры парка карьерной техники // Горная промышленность. – 2011. – №6. – С. 22-26.

9. Анистратов, К. Ю. Разработка метода формирования структуры комплексной механизации горных работ на карьерах: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.05.06 / К. Ю. Анистратов. - Апатиты., 2013. – 375 с.

10. Антонов, Ю.А., Квагинидзе, В.С., Козовой, Г.И., Корецкий, В.Б., Чакветдзе, Ф.А. Автомобильный транспорт на карьерах. Конструкции, эксплуатация, расчет. – М: Горная Книга, 2012. – 408 с.

11. Арсентьев, А.И. Разработка месторождений твёрдых полезных ископаемых открытым способом / А.И. Арсентьев. – СПб.: РИЦ СПГГИ, 2010. – 117 с.

12. Артамонов, П.В. Влияние эксплуатационных факторов на параметры долговечности металлоконструкций большегрузных карьерных автосамосвалов // Горное оборудование и электромеханика. 2010. – № 5. – С. 43-47.

13. БЕЛАЗ: IMS - самосвал под контролем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mining-media.ru/ru/article/transport/18227-belaz-ims-samosval-pod-kontrolem> (дата обращения 11.05.2025).

14. Большие глубины – новые технологии / Мельников, Н. Н., Козырев, А. А., Лукичев, С. В. // Вестник Кольского научного центра РАН, 2013. № 4. С. 58–67.

15. Большунова, О. М. Пути повышения эффективности использования карьерного автотранспорта. Записки Горного института, 2004. Т. 157. С. 104–108.

16. 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.

17. 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. Пушкарёв // Горная промышленность. – 2024. – № 1. – С. 71-76.

18. 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.

19. Брауде, В.И. Надежность горно-транспортных машин / В.И. Брауде, Л.Н. Семенов. Л.: Машиностроение, 1986.

20. Бурмистров, К. В. Разработка геотехнологических решений по сохранению устойчивости функционирования горнорудных предприятий путем поэтапного вскрытия запасов глубоких горизонтов при открытой и комбинированной отработке крутопадающих месторождений :дис. ... д-ра техн. наук : 25.00.22 / Бурмистров Константин Владимирович. – Магнитогорск, 2022. – 340 с.

21. Бухгалтерская отчетность АО «ЕВРАЗ Качканарский ГОК» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.audit-it.ru/buh_otchet/6615001962_ao-evraz-kgok (дата обращения 11.05.2025).

22. Бухгалтерская отчетность ОАО «Ковдорский ГОК» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.audit-it.ru/buh_otchet/5104002499_profkom-oao-kovdorskiy-gok (дата обращения 11.05.2025).

23. Васильев, М. В., Смирнов, В. П., Кулешов, А. А. Эксплуатация карьерного автотранспорта. – М.: Недра, 1979. – 280 с.

24. 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.

25. Вишняков, Г.Ю. Обоснование регламента технического обслуживания и ремонта карьерных автосамосвалов с учетом уровня загрузки в конкретных условиях эксплуатации : дис. ... канд. техн. наук: 2.8.8 / Вишняков Георгий Юрьевич. – СПб, 2024. – 149 с.

26. Выбор рациональной модели карьерного самосвала для проектируемых карьеров ОАО "Апатит" / Кулешов, А. А., Ланков, П. Ю., Серебренников, О. Д. // Горный информационно-аналитический журнал, – 2005. – №11. – С. 267–274.

27. Гетопанов, В.Н. Проектирование и надежность средств комплексной механизации / В.Н. Гетопанов, В.М. Рачек. М.: Недра, 1986.

28. Глебов, А. В., Кармаев, Г. Д. Определение предельных сроков эксплуатации карьерных самосвалов // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2015. № 1. С. 50–61.

29. Журавлев, А.Г., Черепанов, В.А., Карпов, В.А., Невежин, А.Ю. Рекомендации по эксплуатации и улучшению качества содержания карьерных автодорог Олимпиадинского и Благодатного горно-обогатительных комбинатов. Горная промышленность. 2023. – №5. – С.88–95.

30. Зырянов, И. В. Опыт эксплуатации карьерных автосамосвалов в АК «АЛРОСА» / И. В. Зырянов // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2003.

31. Зырянов, И. В. Повышение эффективности систем карьерного автотранспорта в экстремальных условиях эксплуатации: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.05.06 / И.В. Зырянов. - СПб., 2006. - 378 с.

32. Зырянов, И. В. Повышение эффективности систем карьерного автотранспорта в экстремальных условиях эксплуатации : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Игорь Владимирович Зырянов ; Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г. В. Плеханова. – Санкт-Петербург, 2006. – 378 с

33. Использование системы диспетчерского управления для повышения производительности работы автосамосвалов (на примере угольного разреза) / Федорина, А.В., Шаронова, А.А., Осинцев, Н.А., Пыталев, И.А. // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2015. – №1(6). – С. 29-34.

34. К обоснованию параметров крутонаклонных автосъездов при вскрытии глубоких горизонтов кимберлитовых карьеров / Ю. И. Лель, И. А. Глебов, А. Б.

Буднев и др. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2020. – № 7. – С. 21-32.

35. Казарез, А. Н., Кулешов, А. А. Эксплуатация карьерных автосамосвалов с электромеханической трансмиссией. – М.: Недра, 1988. 264 с.

36. Калявин, В.П. Основы теории надежности и диагностики. СПб: Элмор, 1998.

37. Клебанов, А. Ф. Информационные системы горного производства и основные направления развития автоматизации открытых горных работ // Горная промышленность, 2015. – №2 (120). С. 93-95

38. Клебанов, А.Ф. Стратегия эффективного управления горно-транспортным оборудованием при открытой добыче полезных ископаемых с помощью информационных динамических систем // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – С. 55-59.

39. Клебанов, А. Ф. Оценка величины вероятности внутрисменного отказа двигателя автосамосвала при ведении открытых горных работ / А. Ф. Клебанов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 1. – С. 71-75.

40. Коптев, В. Ю. Методология выбора транспортных машин для формирования транспортных систем горных предприятий / В.Ю. Коптев // Современная техника и технологии. – 2015. – № 4

41. Коптев, В.Ю. Обоснование выбора эффективной модели карьерного автосамосвала. Современная техника и технологии, 2014. № 5 (33). С. 23.

42. Косолапов, А.И. Оценка эффективности применения систем автоматического управления горно-транспортным оборудованием в глубоких карьерах / Косолапов, А.И., Токаренко, А.В. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. №4. С. 307-310

43. Краткий справочник по открытым горным выработкам / Н.В. Мельников. – М.: Недра, 1982. – 414 с.

44. 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.

45. Кулешов, А. А. Основные направления повышения эффективности карьерного автотранспорта на современном этапе развития горных работ. Горный информационно-аналитический бюллетень, 2000. № 1. С. 197–200.

46. Кулешов, А.А. Перспективы развития минерально-сырьевой базы России и оценка рынка систем диспетчеризации горно-транспортных комплексов на открытых и подземных работах. Горное оборудование и электромеханика, 2007. № 3. С. 23-28.

47. Кулешов, А.А., Докукин, В.П. Надежность горных машин и оборудования / Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет). СПб, 2004. 104 с.

48. Кулешов, А.А., Коптев, В.Ю. Мониторинг экологических и энергетических характеристик карьерных автосамосвалов. Горное оборудование и электромеханика. 2006. № 9. С. 11-17.

49. Кулешов, А. А. Теоретические основы высокоэффективной эксплуатации мощных систем карьерного автотранспорта : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Алексей Алексеевич Кулешов ; Горный институт им. Г В. Плеханова. – Ленинград, 1983. – 31 с.

50. Лель, Ю. И. Систематизация условий эксплуатации карьерного автотранспорта по энергетическому критерию / Лель Ю. И., Глебов И. А., Ганиев Р. С., Иванова О. А. // Проблемы недропользования. 2017, №2 (13). С. 16-25.

51. Лель, Ю. И. Методы расчета параметров устойчивой работы автотранспорта глубоких карьеров : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Юрий Иванович Лель ; ИГД УрО РАН и УГГГА. – Екатеринбург, 1999. – 35 с

52. Лигоцкий, Д. Н. Анализ опыта внедрения беспилотной техники на карьерах и оценка влияния на параметры систем открытой разработки месторождений / Д. Н. Лигоцкий, Н. А. Долгушин // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2025. – № 30. – С. 99-105.

53. Лигоцкий, Д. Н. Анализ опыта применения безлюдных технологий при открытой разработке месторождений и перспективы их развития / Д. Н. Лигоцкий, Н. А. Долгушин // Горный журнал. – 2025. – № 2. – С. 42-47.

54. Марголин, И.И. Основы теории надежности горных транспортных машин / ЛГИ. Л., 1980.

55. Мариев, П. Л., Кулешов, А. А., Егоров, А. Н., Зырянов, И. В. Карьерный автотранспорт: состояния и перспективы. – СПб.: Наука, 2004. – 429 с.

56. Материалы компании БЕЛАЗ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://autoinfo24.ru/rukovodstva-po-remontu/inomarki/belaz> (дата обращения 11.05.2025).

57. Методика нормирования расхода топлива автосамосвалами в глубоких карьерах / Лель Ю. И., Зырянов И. В., Ильбульдин Д. Х., Мусихина О. В., Глебов И. А. //

58. Молотиллов, С. Г., Васильев, Е. И., Кортелев, О. Б., Норри, В. К., Левенсон, С. Я., Гендлина, Л. И., Тишков, А. Я. Интенсификация погрузочно-транспортных работ на карьерах. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 208 с.

59. Наговицын, Г. О. Автоматизированное планирование открытых горных работ для сплошных систем разработки в горно-геологической информационной системе MINEFRAME / Г. О. Наговицын // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 12-1. – С. 42-51.

60. Обоснование параметров карьерных транспортных коммуникаций на различных этапах разработки месторождения / Бурмистров К. В., Кольга А. Д., Шакшакпаев А. Н., Осинцев Н. А., Бурмистрова И. С. // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2015. № 15. С. 140–146.

61. Обоснование рациональных режимов работы карьерных автосамосвалов при сверхнормативной эксплуатации / Г. Ю. Вишняков, А. Е. Пушкарев, **Е. Ю. Ботян**, В. С. Хлопонина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 11-1. – С. 24-37.

62. Открытая разработка месторождений полезных ископаемых / Е.Ф. Шешко. – М.: Углетехиздат, 1957. – 495 с.

63. Открытые горные работы в сложных условиях / В.В. Ржевский, Ю.И. Анистратов, С.А. Ильин; – М.: Недра, 1964. – 297 с.: ил.

64. Отраслевые дорожные нормы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200015514> (дата обращения 11.05.2025).

65. Поляков, А.Г. Автоматизированная система управления горно-транспортным комплексом // Записки Горного института. 2008. Т. 177. С. 50-55

66. Потапов, М. Г. Исследование технологических схем и параметров оборудования транспорта на открытых горных разработках / М.Г. Потапов: Дис. ... докт. техн. наук. – М., 1971. – 339 с.

67. Потапов, М. Г. Карьерный транспорт – настоящее и будущее / М.Г. Потапов // Горная промышленность России на рубеже 20-21 вв.: Тез докл. Междунар. конф., г. Москва, 15-17 нояб. 1994г. – М., 1994. – С. 3.

68. Проектирование двигателей для карьерных автосамосвалов с учетом горнотехнических условий эксплуатации / П. И. Тарасов, М. Л. Хазин, Е. В. Фефелов, В. В. Фурзиков // Горная промышленность. – 2017. – № 6(136). – С. 60.

69. Решение проблемы эффективного применения и развития АСУ ГТК на основе многолетнего опыта разработки и эксплуатации систем на горных предприятиях / Белых, К. В., Клебанов, Д. А. // Горная промышленность, 2016. №2 (126). С. 44-49

70. Ржевский, В. В. Открытые горные работы: Производственные процессы: Учебник. Изв. стереотип / В.В. Ржевский. – М.: Книжный дом «ЛИБКОМ», 2013. – 512 с

71. Сафрончук, К.А. Организация технического обслуживания и текущего ремонта горных машин в полевых условиях при помощи мобильных самоходных

мастерских / К.А. Сафрончук, В.И. Князькина, С.Л. Иванов // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования. – 2019. – Т. 1. – С. 82 – 86.

72. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 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».

73. Сетевая платформа автоматизации прогнозирования отказов карьерных самосвалов / И. В. Зырянов, М. В. Корняков, К. А. Непомнящих и др. // Горная промышленность. – 2024. – № 3. – С. 56-63.

74. Синьчковский, В.Н., Вокин, В.Н. Синьчковская, Е.В. Технология открытых горных работ: Учебное пособие / Под редакцией В.Н. Синьковского – 2-ое изд. Перераб. и доб. – Красноярск: СФУ, 2007. 528 с.

75. Система контроля качества технологических дорог / Мазманиян А. О., Скот В., Глушанков И. И. // Горная промышленность, 2008. №3 (79). С. 28-31.

76. Совершенствование нормирования расхода топлива карьерными автосамосвалами на основе горизонтальных эквивалентов вертикального перемещения горной массы / Лель Ю. И., Салахияев Р.Г., Арефьев С. А., Сандригайло И. Н. // Известия вузов. Горный журнал, 2014. №2. С. 107-116.

77. Сравнительная оценка природоемкости карьерных автосамосвалов и дизель-троллейбусов / Шешко, Е. Е. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 6. С. 119–125.

78. Средние месячные и годовые температуры воздуха в Качканаре [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.climate-data.org> (дата обращения 11.05.2025).

79. Средние месячные и годовые температуры воздуха в Ковдоре [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://pogodaiklimat.ru/history/22204.htm> (дата обращения 11.05.2025).

80. Строительство горных выработок в сложных горнотехнических условиях: Справочник/ Б. Л. Картозия, В. А. Пшеничный, И. Г. Косков и др.; – М.: Недра, 1992. – 320 с.: ил.

81. Схематические геологическая карта и разрез Гусевогорского и Качканарского месторождений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://wiki.geologyscience.ru/index.php> (дата обращения 11.05.2025).

82. Сычев, Ю. А. Анализ основных видов и причин повреждения тяговых электродвигателей карьерных самосвалов в электротехнических комплексах / Ю. А. Сычев, А. Н. Назарычев, Г. В. Дяченко // Энергетик. 2023. – № 9. – С. 22-26.

83. Сычев, Ю. А. Повышение безопасности труда водителей карьерных самосвалов путем снижения риска возникновения отказов функциональных узлов тягового электропривода в условиях эксплуатации / Ю. А. Сычев, А. Н. Назарычев, Г. В. Дяченко // Безопасность труда в промышленности. 2023. – № 9. – С. 52-58.

84. Тарасов, П. И. Дифференциация условий эксплуатации карьерных автосамосвалов / П. И. Тарасов, И. В. Зырянов, Е. В. Фефелов // Горная промышленность. – 2016. – № 3(127). – С. 51.

85. Транспортные машины: конспект лекций / Ю. А. Плютов.– Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – 252 с.

86. Трофимова, Е. А. Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие / Е. А. Трофимова, Н. В. Кисляк, Д. В. Гилёв ; под общей редакцией Е. А. Трофимовой ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. — Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2018. – 160 с.

87. Трубецкой, К. Н., Кулешов, А. А., Клебанов, А. Ф., Владимиров, Д. Я. Современные системы управления горно-транспортными комплексами: под ред. К. Н. Трубецкого. СПб: Наука, 2007. – 306 с.

88. Трубецкой, К.Н. Автоматизированные системы управления горно-транспортным комплексом / Рашевский В.В., Владимиров Д.Я., Клебанов А.Ф. // «Горная промышленность». 2007. №6 (76). С. 12-14

89. Трубецкой, К.Н. Перспективы применения роботизированной техники на карьерах будущего // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. – №1. – С. 354-363

90. Ушаков, Ю.Ю. Обоснование параметров системы технического обслуживания и ремонта карьерных автосамосвалов : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Ушаков Юрий Юрьевич. – Екатеринбург, 2017. – 139 с.

91. Фефелов, Е.В. Обоснование критерия эффективности эксплуатации силовых установок автосамосвалов на глубоких карьерах : дис. ... канд. техн. наук: 25.00.22 / Ушаков Юрий Юрьевич. – Екатеринбург, 2012. – 139 с.

92. Хажиев, В. А. Методологические основы развития системы эксплуатации комплекса технологического горного оборудования предприятия с открытым способом разработки месторождения : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Хажиев Вадим Аслямович, 2023. – 368 с.

93. Хорошавин, С. А. Определение времени движения карьерного самосвала с электромеханической трансмиссией / С. А. Хорошавин, М. В. Заборный // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XIX международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 20–21 мая 2021 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2021. – С. 425-428.

94. Хорошавин, С. А. Определение времени движения карьерного самосвала с электромеханической трансмиссией / С. А. Хорошавин, М. С. Заборный, П. Е. Безкоровайный // Интеграция науки, образования и производства - основа

реализации Плана нации : Труды Международной научно-практической конференции, Караганда, 16–17 июня 2022 года. – Караганда: Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова, 2022. – С. 267-269.

95. Худоногов, Д.Ю., Никитенко, М.С., Кизилов, С.А. Анализ отклонений дорожного покрытия при движении автономного транспортного средства // Горная промышленность. – 2024. – №5S. – С.54–58.

96. Шишлянников, Д. И. Обеспечение надежной работы и эффективного сервиса проходческо-очистных комбайнов для добычи калийных руд / Д. И. Шишлянников // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2020. – № 7. – С. 103-109.

97. Эрикссон, М., Лёф, А., Лёф, О. Обзор мирового рынка железной руды за 2019–2020 годы // Горная промышленность. 2021. – №1. – С. 4–82.

98. Яковлев, В. Л. Теория и практика выбора транспорта глубоких карьеров. – Новосибирск: Наука, 1989. – 240 с.

99. Яковлев, В. Л. Специализированные виды автотранспорта для горнодобывающих предприятий / В. Л. Яковлев, П. И. Тарасов, А. Г. Журавлев, А. Г. Ворошилов, А.П. Тарасов, Е. В. Фефелов, В.О. Фурин // Горная промышленность. 2007. № 6 (76). С. 44-50.

100. Яковлев, В. Л., Тарасов П. И., Журавлев А. Г. Новые специализированные виды транспорта для горных работ. – Екатеринбург: УрО РАН, 2011. – 375 с.

101. Яковлев, В. Л., Тарасов П. И., Фурин В. О., Зырянов И. В. Углубочный комплекс для доработки кимберлитовых карьеров. – Екатеринбург: УрО РАН, 2015. – 268 с.

102. Яковлев, В. Л. Теоретические основы выбора транспорта рудных карьеров : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Виктор Леонтьевич Яковлев ; ИГД МЧМ СССР. – Свердловск, 1978. – 36 с.

103. Artega F., Nehring M., Knights P. and Camus J. Schemes of Exploitation in Open Pit Mining // Mine Planning and Equipment Selection Conference. – 2014. – C. 1307–1323. DOI: 10.1007/978-3-319-02678-7_126.

104. 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.

105. Chung, H.Ta. A linear model for surface mining haul truck allocation incorporating shovel idle probabilities / H.Ta. Chung, A. Ingolfsson, J. Doucette // European Journal of Operational Research. 2013. № 231. C.770–778.

106. Flores, G., Catalan, A. A transition from a large open pit into a novel «macroblock variant» block caving geometry at Chuquicamata mine, Codelco Chile // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. 11. № 3.

107. Gomilanović M., Doderović A., Stanić N., Milijanović N. Analytical model for determining the availability of continuous surface exploitation systems, case study: i btd system of the open pit Drmno. 2023. №1. C. 27–35.

108. Han, L.; Liu, P. Design of Unmanned Road Widths in Open-Pit Mines Based on Offset Reaction Times. Appl. Sci. 2024, 14, 2995.

109. Improving the methodology of choosing machinery models for the formation of an excavator and vehicle fleet during the modernization of a mining transport system, with account for the Arctic specifics / **Botyan E.**, Pushkarev A. // Transportation Research Procedia, 2021. № 57. C. 106–112.

110. Jégourel, Y. The global iron ore market: From cyclical developments to potential structural changes // The Extractive Industries and Society. 2020. №. 7(3).C. 1128–1134.

111. Kumar, A., Krishnan, V. A Study on Reliability Analysis of Haul Trucks. International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology. 2017. № 4(3).

112. Kuznetsov, D., Kosolapov, A. Dynamic of performance of open-pit dump trucks in ore mining in severe climatic environment. *Transportation Research Procedia*. 2022. №63. C. 1042–1048.
113. Mayton, A. G. Investigation of human body vibration exposures on haul trucks operating at U.S. surface mines/quarries relative to haul truck activity // *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2018. №64. C. 188–198.
114. Qing-dong Yan, Xiu-qi Chen, Hong-chao Jian, Wei Wei, Wei-da Wang, Heng Wang. Design of a deep inference framework for required power forecasting and predictive control on a hybrid electric mining truck // *Energy*, 2022, № 238, C. 121–141.
115. Soofactaei, A. A comprehensive investigation of loading variance influence on fuel consumption and gas emissions in mine haulage operation / S.M. Aminossadati, M.S. Kizil, P. Knights // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2016. 6 (26). C.995-1001.
116. Soofactaei, A. A discrete-event model to simulate the effect of truck bunching due to payload variance on cycle time, hauled mine materials and fuel consumption / S.M. Aminossadati, M.S. Kizil, P. Knights // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2016. 5 (26). C.745-752
117. The Role of Multimodal Transportation in Ensuring Sustainable Territorial Development: Review of Risks and Prospects / Makarova I., Serikkaliyeva A., Gubacheva L., Mukhametdinov E., Buyvol P., Barinov A., Shepelev V., Mavlyautdinova G. // *Sustainability*. № 15 (7).
118. 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. №817.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт внедрения

Утверждаю
Генеральный директор
ООО «М4Е», к.т.н.
Шмидт В.Э.

Дата «21» марта 2025 г.

АКТ
о внедрении результатов кандидатской диссертации
Ботяна Евгения Юрьевича
по научной специальности 2.8.8 «Геотехнология, горные машины»

Специальная комиссия в составе:

Председатель – Шмидт В.Э.;

Члены комиссии – Архипов К.П., Козлов В.А.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме «Обоснование регламента технического обслуживания и ремонта подвесок карьерных автосамосвалов с учетом осложненных горнотехнических условий эксплуатации» аспиранта Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II Ботяна Е.Ю., рекомендуются к использованию в деятельности ООО «М4Е» в виде рекомендаций по уточнению существующих подходов к организации мероприятий по поддержанию установленного уровня надежности карьерных автосамосвалов при помощи уточнения периодичности между капитальными ремонтами их подвесок, учитывающей влияние группы параметров трасс транспортирования, обусловленных осложненными горнотехническими условиями эксплуатации, на срок службы этого узла.

Использование указанных рекомендаций позволяет подготовить материально-техническую базу необходимую для восстановления работоспособности подвесок карьерных автосамосвалов после их отказов. Тем самым становится возможным сократить длительность организационных простоев и время обеспечения материальными ресурсами, и, как следствие, сократить время ремонта подвесок карьерных автосамосвалов.

Председатель комиссии:

Генеральный директор, к.т.н.

Члены комиссии:

Директор по продажам горной техники, к.т.н.

Сервисный инженер



Шмидт В.Э.



Архипов К.П.



Козлов В.А.



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2023662579

**Программа для определения показателей
эффективности эксплуатации карьерных
автосамосвалов в режиме топливной экономичности**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Ботян Евгений Юрьевич (RU), Пушкарев Александр
Евгеньевич (RU), Лавренко Сергей Александрович (RU)*



Заявка № **2023661121**
Дата поступления **01 июня 2023 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **08 июня 2023 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю. С. Зубов