

На правах рукописи



Бочкарев Юрий Семенович

**ОБОСНОВАНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО
ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ ПРИ
РАЗРАБОТКЕ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КРИОЛИТОЗОНЫ**

Специальность 2.8.8. «Геотехнология, горные машины»
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2025

Работа выполнена на кафедре «Горное дело» ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова».

Научный руководитель: **Зырянов Игорь Владимирович**
доктор технических наук, Политехнический институт (филиал) ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова» в г. Мирном, профессор кафедры «Горного дела».

Официальные оппоненты: **Хорешок Алексей Алексеевич**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», профессор кафедры горных машин и комплексов.

Журавлёв Артём Геннадиевич
кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией транспортных систем карьеров и геотехники.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

Защита диссертации состоится « 23 » октября 2025 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.404.09 при ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660025, г. Красноярск, пр-т им. газеты «Красноярский рабочий», 95, ауд. 219.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и на сайте университета: <https://sfu.ru/ru>

Автореферат диссертации разослан « ___ » _____ 2025 г.

И.о. учёного секретаря
диссертационного совета

Анушенков Александр Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Освоение запасов крупнообъемных россыпных месторождений открытым способом с использованием автотранспортной техники обеспечило возможность освоения запасов месторождений, к которым невозможно подведение воды для процессов обогащения, увеличение производственной мощности предприятий и ведение горных работ круглогодично. Такая технология используется на алмазных и золотоносных россыпях со схожими условиями Анабарского, Жиганского, Мирнинского, Нюрбинского и Усть-Янского района, разрабатываемых АО «Алмазы Анабара», АО «АЛМАР», АК «АЛРОСА» (ПАО), АО «РИК Плюс».

Условия эксплуатации имеют ряд особенностей, которые влияют на эффективность работы машин к числу которых можно отнести низкие климатические температуры в зимний период, большой суточный ход температуры в межсезонье, характер залегания россыпей, пораженность горных пород мерзлотой и обводненность (льдиность торфов составляет от 35% до 90%, песков около 20%), зависимость их состояния от сезонных факторов, состояние дорог зависит от горно-геологических и горнотехнических условий залегания россыпи, вахтовый метод работы среди рабочих профессий.

Более 70% парка транспортных средств представлено самосвалами БелАЗ, остальную часть составляют Caterpillar, Perlini, Howo, Volvo, Scania, Sany. Практика их эксплуатации показывает, что фактическая производительность в теплое время года ниже технической возможной в два и более раза. Потеря производительности обусловлена влиянием фактора сезонности. Смена времен года оказывает действие на условия работы карьерных самосвалов.

Исследованием влияния различных эксплуатационных факторов на эффективность использования карьерных самосвалов занимались академики РАН Мельников Н.В., Ржевский В.В., Трубецкой К.Н., член-корреспондент АН СССР Спиваковский А.О., член-корреспондент РАН Яковлев В.Л., академик АН РС(Я) Ишков А.М., доктора и кандидаты технических наук Анистратов К.Ю., Васильев М.В., Веницкий К.Е., Галкин В.А., Зырянов И.В., Казарез А.Н., Квагинидзе В.С., Кох П.И., Кулешов А.А., Хорешок А.А., Крамаренко Г.В., Лель Ю.И., Мариев П.Л., Потапов М.Г., Смирнов В.П., Шешко Е.Е., Шейнин А.М. и другие. В проведенных ранее исследованиях основное внимание уделяется формированию, развитию и повышению эффективности транспортных систем на коренных месторождениях. Как правило, рассматриваются, влияющие факторы характерные карьерам – высота подъема горной массы, продольные уклоны, низкие климатические температуры.

Обзор научных трудов в области эксплуатации наземного транспорта на карьерах, россыпях и автотранспортных предприятиях показал, что в открытой печати информация представлена разрозненно, отсутствуют работы, связанные с комплексным изучением эффективности эксплуатации карьерных самосвалов на россыпных месторождениях криолитозоны.

В связи с этим задача, связанная с исследованием вопросов эксплуатации карьерных самосвалов при разработке россыпных месторождений криолитозоны открытым способом и направленная на разработку методики корректировки

периодичности технического обслуживания и ремонта, позволяющей учесть влияющие факторы, уменьшить количество отказов и повысить эффективность функционирования технологического транспорта, является актуальной.

Цель работы – установление закономерности изменения количества отказов карьерных самосвалов при разработке россыпных месторождений криолитозоны открытым способом с учетом, влияющих факторов и корректировка на этой основе периодичности технического обслуживания и ремонта, что обеспечит повышение эффективности эксплуатации технологического транспорта.

Идея работы заключается в том, что устойчивое повышение производительности карьерных самосвалов при разработке россыпных месторождений криолитозоны открытым способом обеспечивается соответствием периодичности технического обслуживания и ремонта условиям эксплуатации и их техническому состоянию.

Объект исследования – периодичность и количество отказов карьерных самосвалов при разработке россыпных месторождений криолитозоны открытым способом.

Предмет исследования – зависимость количества отказов карьерных самосвалов от времени года и срока эксплуатации при разработке россыпных месторождений криолитозоны открытым способом.

Задачи исследования:

1. Выполнить оценку эффективности эксплуатации карьерных самосвалов при разработке россыпных месторождений криолитозоны.

2. Установить закономерность изменения количества отказов карьерных самосвалов при разработке россыпных месторождений криолитозоны.

3. Проанализировать систему технического обслуживания и ремонта карьерных самосвалов, способы учета специфики эксплуатации при корректировке ее периодичности.

4. Разработать способ учета специфики эксплуатации карьерных самосвалов при разработке россыпных месторождений для корректировки периодичности их технического обслуживания и ремонта.

5. Апробировать, полученные результаты в АО «Алмазы Анабара».

Научные положения, выносимые на защиту:

1. При разработке россыпных месторождений криолитозоны открытым способом эксплуатационные характеристики и количество отказов ходовой части карьерных самосвалов имеют выраженную сезонную зависимость, обусловленную влиянием дорожных условий, значимость, которых в 2 раза выше срока эксплуатации, природно-климатических и организационных факторов.

2. Использование математической модели, представленной системой дифференциальных уравнений четвертого порядка позволяет установить функциональную связь между количеством отказов карьерных автосамосвалов, временем года и сроком эксплуатации, а также выполнять их прогнозирование со средней абсолютной процентной ошибкой не более 20%.

3. Периодичность технического обслуживания и ремонта карьерных автосамосвалов при разработке россыпных месторождений криолитозоны

открытым способом для сокращения количества отказов следует уменьшать по мере увеличения срока службы.

Научная новизна результатов работы:

1. Установлены закономерности, характеризующие – влияние плеча транспортировки на производительность карьерных самосвалов, связь между сменным пробегом и расходом топлива, зависимость количества отказов от температуры воздуха, времени года и срока эксплуатации.

2. Установлено, что при разработке россыпных месторождений криолитозоны открытым способом количество отказов ходовой части карьерных самосвалов в теплое время года в 2 раза больше, чем в холодное, что обусловлено влиянием дорожных условий, значимость, которых в 2 раза выше срока эксплуатации, природно-климатических и организационных факторов.

3. Разработана методика, позволяющая установить функциональную связь между количеством отказов карьерных самосвалов, временем года и сроком эксплуатации на основе аппроксимирующей функции, отличающаяся тем, что она обеспечивает выявление сезонной цикличности отказов и прогнозирование их количества с высокой точностью (средняя абсолютная процентная ошибка не более 20%).

4. Предложена методика корректировки периодичности технического обслуживания и ремонта карьерных самосвалов с постепенным уменьшением интервалов профилактических мероприятий с увеличением срока службы машин, основанная на анализе количества их отказов, отличающаяся использованием меньшего объема данных, отсутствием необходимости учета категории условий эксплуатации.

Практическая значимость результатов работы заключается в том, что инженеры и механики предприятий горнодобывающей отрасли, конструкторы, научно-исследовательские институты, разрабатывающие вопросы эффективной эксплуатации карьерных самосвалов и вузы, осуществляющие подготовку горных инженеров, могут использовать:

1. Зависимости, описывающие изменение производительности карьерных самосвалов от плеча транспортировки, удельного расхода топлива от сменного пробега, количества их отказов от температуры воздуха, времени года и срока эксплуатации, позволяющие прогнозировать и оптимизировать количественный состав парка машин для выполнения заданного объема работ.

2. Программу для ЭВМ «Анализ временных рядов количества отказов», позволяющую выявлять сезонную цикличность отказов карьерных самосвалов и прогнозировать их количество с высокой точностью (средняя абсолютная процентная ошибка не более 20%).

3. Методику корректировки периодичности технического обслуживания и ремонта карьерных самосвалов по количеству их отказов в зависимости от времени года и срока службы, отличающуюся использованием меньшего объема данных, отсутствием необходимости учета категории условий эксплуатации.

Соответствие диссертации научной специальности: диссертация соответствует паспорту специальности 2.8.8 «Геотехнология, горные машины» в части следующих направлений исследований – п. 15 «Методы и средства повышения эксплуатационных характеристик и надежности горных машин и

оборудования, в том числе за счет обоснования рациональных режимов их функционирования на открытых и подземных горных работах», п. 16. «Техническое обслуживание и ремонт горных машин и оборудования с учетом специфики горно-геологических и горнотехнических условий их эксплуатации».

Методы исследования. Используются: анализ и обобщение статистических данных по эксплуатации карьерных автосамосвалов при разработке россыпных месторождений криолитозоны, методы теории вероятностей и математической статистики, экспертный опрос, положения теории надежности технических систем, математическое моделирование.

Обоснованность и достоверность результатов, научных положений и выводов подтверждается значительным объемом статистических данных об эксплуатации и отказах карьерных самосвалов, сходимостью результатов теоретических и эмпирических данных, установленных на основе апробированных методов теории вероятностей и математической статистики, производственной проверкой результатов исследования.

Личный вклад автора заключается в сборе и обработке статистических данных, формировании целей и задач научного исследования, в усовершенствовании и адаптации метода косинор-анализ, разработке программы для прогнозирования количества отказов карьерных самосвалов, в разработке способа учета влияющих факторов при корректировке периодичности технического обслуживания и ремонта.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Результаты научно-исследовательской работы внедрены в АО «Алмазы Анабара» (расчетный экономический эффект составляет 3,72 млн руб в год на 10 машин). Материалы диссертационной работы применены в учебных дисциплинах «Надежность горных машин» и «Транспортные машины в горном деле» кафедры горного дела СВФУ. Издано учебное пособие с грифом УМО ВУЗов РФ по образованию в области горного дела «Эксплуатация горно-транспортных машин на Севере», Москва: Инфра-М, 2021. - 201 с. (авторы А.М. Ишков, М.А. Викулов, Ю.С. Бочкарев).

Апробация результатов работы. Результаты проведенного исследования докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах: Научно-практическая конференция молодых ученых СВФУ им. М.К. Аммосова - Якутск, 2014; Конкурс «УМНИК» - Якутск, 2014; «Лаврентьевские чтения» - Якутск, 2014; «Пути решения актуальных проблем добычи и переработки полезных ископаемых. Добыча золота в условиях Крайнего Севера» - Якутск, 2014; «Неделя горняка-2015» - Москва, 2015; Грант Главы Республики Саха (Якутия) - Якутск, 2015, 2016; «Совершенствование технологии горных работ и подготовка кадров для обеспечения техносферной безопасности в условиях Северо-Востока России» - Якутск, 2018; «Игошинские чтения» - Иркутск, 2018, 2021; «SGEM 2020» - Альбена, Болгария, 2020; «Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России» - Якутск, 2021; «Горнодобывающая промышленность в 21 веке: вызовы и реальность» - Мирный, 2021; Уральский Горнопромышленный форум, XII Конференция «Рудник Будущего» - Екатеринбург, 2022; Международный научный симпозиум

«Неделя горняка-2023» - Москва, 2023; XXI Международная научно-техническая конференция «Чтения памяти В.Р. Кубачека» - Екатеринбург, 2023; III Международная научно-практическая конференция «Наука и инновационные разработки - Северу» - Мирный, 2024.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, из которых 8 в изданиях, включенных в перечень рекомендованных ВАК РФ, в зарубежных изданиях, входящих в Web of Science/Scopus - 5, в других изданиях - 4, учебное пособие - 1.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, включающего 140 наименований, в том числе 12 на иностранном языке и 5 приложений, изложена на 142 страницах, включает 20 таблиц и 50 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, приведены цель и задачи исследований, защищаемые положения, научная новизна, практическая значимость.

В первой главе выполнен анализ технико-эксплуатационных показателей работы карьерных самосвалов, статистики их отказов за 5 лет при разработке россыпных месторождений криолитозоны. Выполнен обзор литературных источников, посвященных вопросам эксплуатации технологического транспорта на карьерах, россыпях и автотранспортных предприятиях, способов совершенствования эксплуатации машин. Поставлены цель и задачи исследования.

Во второй главе приведены программа работы, методика исследований, природно-климатические, горно-геологические, горнотехнические, дорожные и организационные условия разработки россыпных месторождений открытым способом. Произведена оценка значимости факторов, влияющих на количество отказов экспертным методом. Выполнен анализ динамики количества отказов, установлена их зависимость от климатической температуры воздуха.

В третьей главе выполнен анализ систем технического обслуживания и ремонта карьерных самосвалов, пути ее совершенствования, методы определения периодичности работ и способы учета влияющих факторов. Разработана методика корректировки и способ расчета коэффициентов, учитывающих зависимость количества отказов от времени года и срока эксплуатации. Предложена методика сглаживания временных рядов, позволяющая устанавливать регрессионную зависимость количества отказов карьерных самосвалов от времени года и срока их эксплуатации, которая реализована в программе Mathcad. Определены условия соблюдения, которых обеспечивает минимальную ошибку расчетов. Рассчитаны коэффициенты корректировки периодичности технического обслуживания и ремонта карьерных самосвалов.

В четвертой главе выполнена корректировка периодичности технического обслуживания и ремонта карьерных самосвалов БелАЗ-7540, полученными коэффициентами. Определены количество и трудоемкость работ

по видам профилактических мероприятий. Приведены результаты производственной проверки результатов работы и выполнена технико-экономическая оценка эффективности.

В приложениях представлены формуляр сбора информации о количестве отказов карьерных самосвалов, форма анкеты опроса экспертов, листинг программы для ЭВМ «Анализ временных рядов количества отказов», приведены графики зависимости количества отказов узлов и агрегатов карьерных самосвалов БелАЗ-7540 от времени года и срока эксплуатации, приложены акты внедрения результатов исследования.

Обоснование защищаемых научных положений на базе результатов диссертационного исследования осуществляется следующим образом.

Практика эксплуатации карьерных самосвалов БелАЗ-7540 на горных участках прииска Маят показывает, что их фактическая производительность в теплое время года (май-сентябрь) ниже технической возможности более, чем в 1,5 раза и зависит от плеча транспортировки (рис. 1, а). При этом расход топлива увеличивается более, чем в 1,7 раза (рис. 1, б).

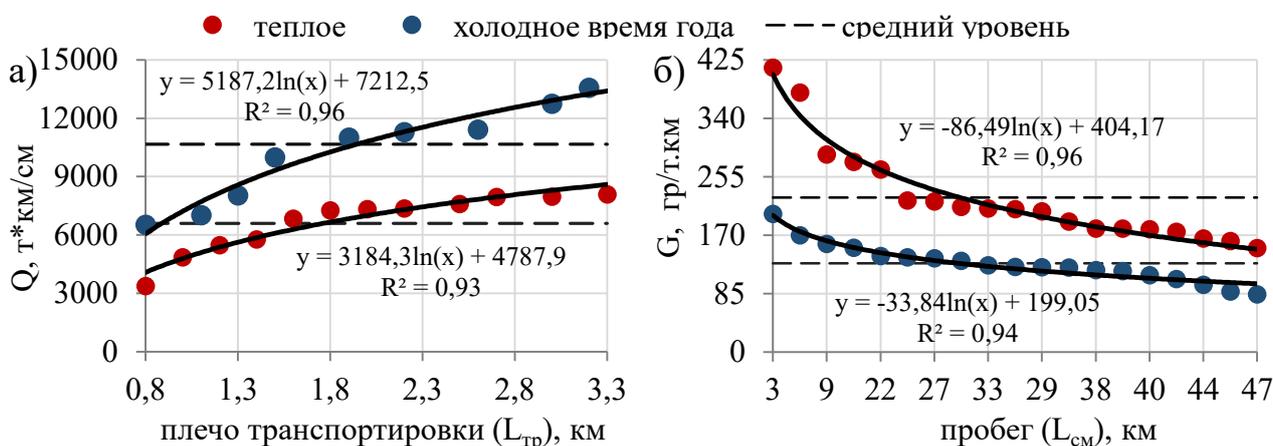


Рисунок 1 – Зависимость производительности (Q) от плеча транспортировки и удельного расхода топлива (G) от среднесменного пробега в среднем за 5 лет

Более половины отказов (51%) приходится на подвеску, силовую установку и ведущий мост. Подвеска, ведущий и передний мост, рулевое управление в теплое время года выходят из строя почти в 2 раза больше (рис. 2).

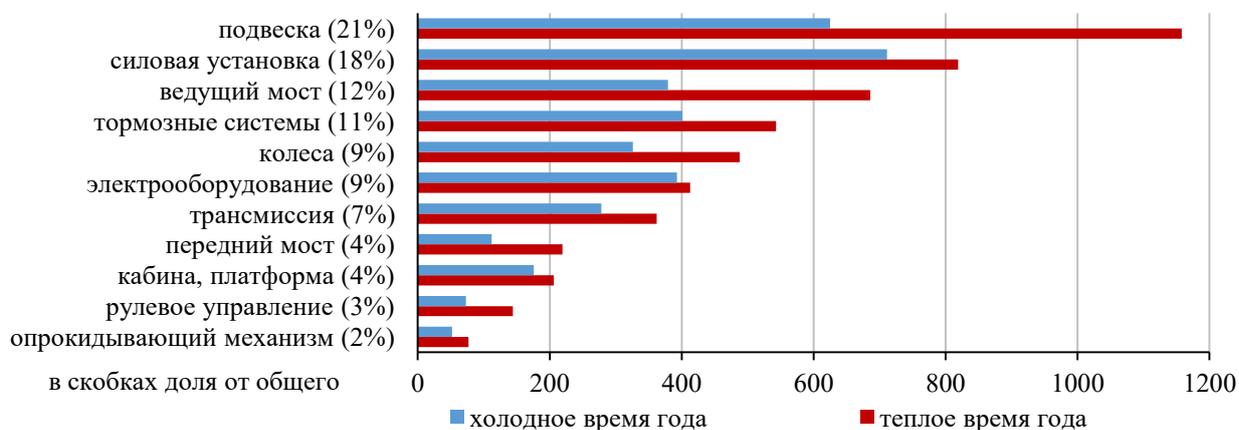


Рисунок 2 - Распределение отказов узлов и агрегатов карьерных самосвалов БелАЗ-7540 по временам года из расчета на 10 машин за 5 лет

С приходом теплого времени года дорожные условия на полигоне постепенно ухудшаются, т.к. многолетнемерзлые горные породы оттаивают и на рабочих площадках начинает образовываться «мачмала» (рис. 3).



Рисунок 3 – Дорожные условия: а) добычной блок на прииске Маят, б) площадка погрузки песков на прииске Маят

На количество отказов карьерных самосвалов оказывают совокупное влияние природно-климатические, горно-геологические, горнотехнические, организационные и дорожные условия, срок эксплуатации. Поэтому в целях определения значимости факторов выполнен экспертный опрос, в котором приняли участие механики и сервисные инженеры горнопромышленных компаний.

Априорное ранжирование, влияющих факторов выполнено двумя способами (рис. 4). В первом предлагалось оценить уровень влияния каждого фактора отдельно, а во втором определить долю от общего. Дорожные условия объединены с горнотехническими и горно-геологическими, т.к. состояние дорог зависит от условий залегания и разработки россыпи.

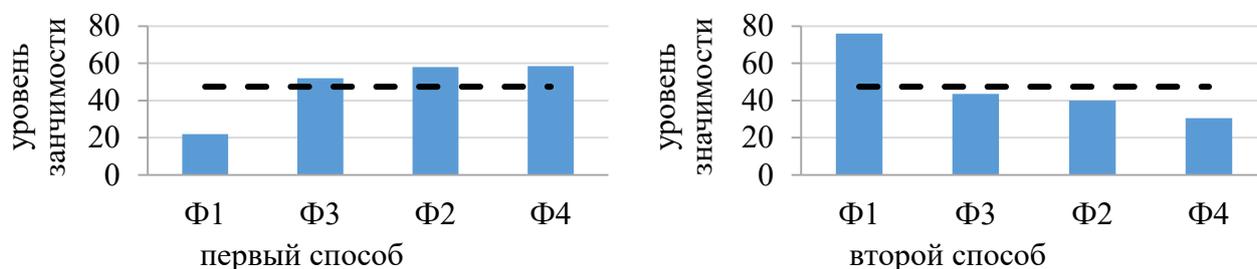


Рисунок 4 – Ранжирование факторов по значимости: Ф1 – дорожные условия, Ф2 – срок эксплуатации, Ф3 – природно-климатические условия, Ф4 – вахтовый метод организации работ

В первом случае значимыми являются те факторы сумма рангов, которых меньше среднего значения, а во втором – наоборот, т.к. наибольший балл был присвоен более весомым. Видно, что в обоих случаях дорожные условия являются значимым фактором и оказывают не менее, чем на два порядка большее влияние на количество отказов, чем остальные факторы.

Динамика отказов в холодное время года более линейная, в теплое время года наблюдаются «уменьшение-увеличение» количества отказов (рис. 5). Пик волны отказов в среднем приходится на июнь-июль. Наблюдается устойчивое повышение количества отказов в теплое время года по сравнению с холодным и с увеличением срока эксплуатации. Графики динамики количества отказов остальных узлов и агрегатов аналогичны представленному.

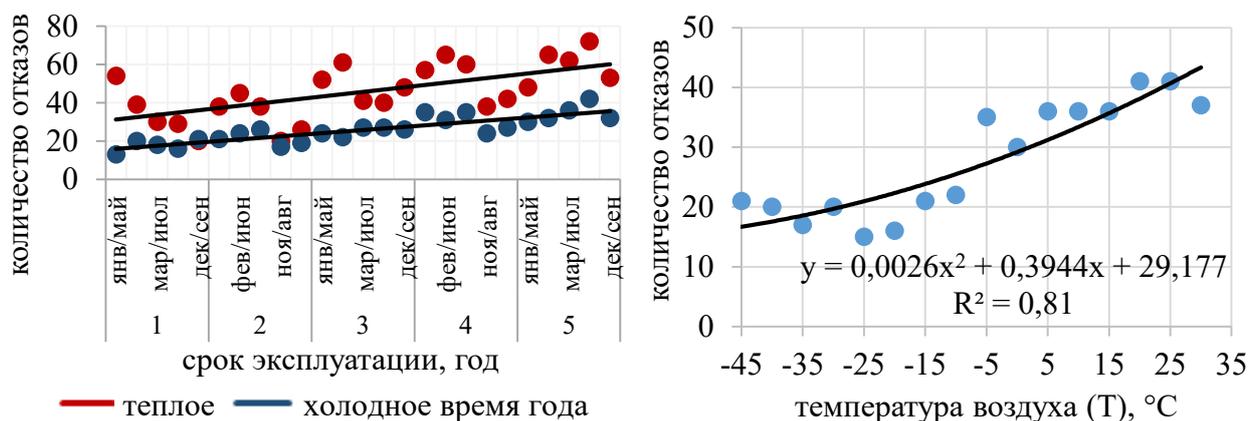


Рисунок 5 - Графики количества отказов подвески карьерных самосвалов БелАЗ-7540 по временам года за 5 лет эксплуатации и зависимости количества отказов их ходовой части от температуры воздуха

График зависимости количества отказов ходовой части карьерных самосвалов от температуры воздуха (рис. 5) показывает, что в весенне-осенний периоды времени года (интервал температур -5°C и $+5^{\circ}\text{C}$, апрель-октябрь) происходит скачкообразное увеличение количества отказов почти в 1,6 раза по сравнению с количеством отказов при -10°C .

Анализ ведомостей дефектов показал, что 35% дефектов составляют повреждение пыльников на опорах гидроцилиндров подвески и рулевого управления и их уплотнений, 22% - течь технических жидкостей и топлива, 18% - повреждение изоляции, соединений в электропроводке, 12% - порезы покрышек, 10% - трещины на вилке ведущего моста, элементах кузова, 3% - прочее (освещение, ремни, болты, шланги, кресло, стекла).

Отсутствие чехлов на гидроцилиндрах подвески и рулевого управления способствует ускоренному изнашиванию поверхностей штоков и уплотнительных колец, что приводит к протечкам гидравлической жидкости. В результате повреждения пыльники перестают выполнять назначенную функцию по защите от пыли и грязи, и удержанию смазки внутри подшипников. Частицы горной породы, попадая в зону контакта узла трения, приводят к абразивному изнашиванию.

Вышеизложенное является обоснованием первого выносимого на защиту научного положения, а именно: при разработке россыпных месторождений криолитозоны открытым способом эксплуатационные характеристики и количество отказов ходовой части карьерных самосвалов имеют выраженную сезонную зависимость, обусловленную влиянием дорожных условий, значимость, которых в 2 раза выше срока эксплуатации, природно-климатических и организационных факторов.

Практика и теория эксплуатации машин показывает, что с увеличением срока работы машины происходят существенные изменения в показателях ее использования, которые характеризуют процесс старения, связанный с расходом ресурса деталей, нарастанием интенсивности отказов, снижением эффективности функционирования, увеличением материальных и трудовых затрат на поддержание работоспособного состояния. Скорость этого

процесса зависит от надежности машины. Узлы и агрегаты машины испытывают воздействие множества факторов. Одни изнашиваются постепенно с постоянной скоростью до возникновения отказа, другие отказывают внезапно. Закономерности с помощью, которых можно формализовать их разные.

На устранение отказов затрачиваются материальные и человеческие ресурсы, объем, которых зависит от логистики доставки, времени года, ценообразования не только на закуп изделий, но и стоимости услуг по их доставке. Причинами, вызывающими необходимость проведения ремонтов, являются отказы, которые оказывает влияние на производственную мощность ремонтной службы.

Временные ряды количества отказов узлов и агрегатов карьерных самосвалов подвержены сезонным колебаниям (рис. 6).

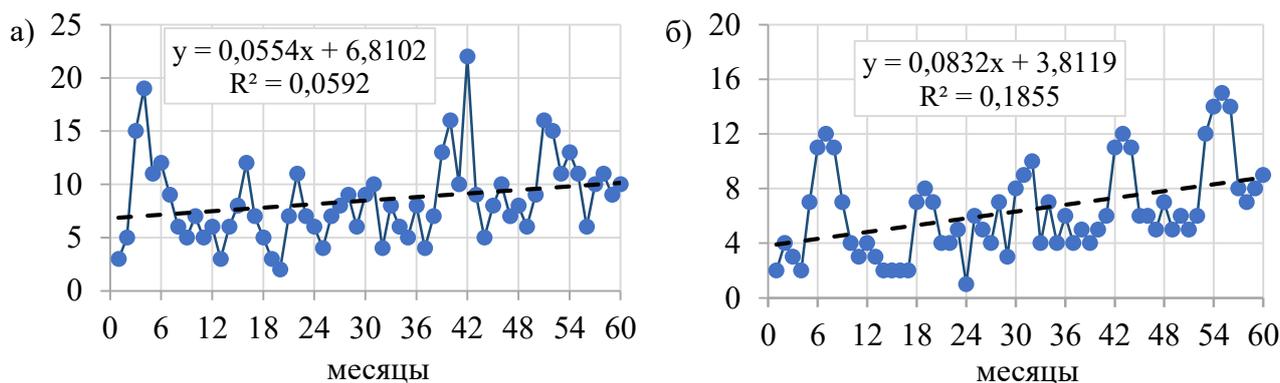


Рисунок 6 - Зависимость количества отказов гидромеханической передачи (а) и передней оси (б) карьерных самосвалов БелАЗ-7540 от срока эксплуатации

Периодические изменения в уровнях временных рядов могут иметь как случайный, так и закономерный характер. Определить закономерность можно методами спектрального анализа путем выравнивания уровней ряда. Одним из методов аналитического выравнивания рядов динамики с известной периодичностью является косинор-анализ, который используется на международном уровне. Преимущества заключаются в возможности восстановления временного ряда количества отказов при определении наличия их зависимости от времени года и срока эксплуатации. Функция, задающая параметры аппроксимации динамического ряда методом наименьших квадратов к синусоиде, имеет следующий вид:

$$U(t) = A \cos(\omega_0 t - \varphi) + h + pt, \quad (1)$$

где A – амплитуда динамического ряда, ω_0 – угловая частота равная $2\pi/T$, T – период динамического ряда, t – время, φ – акрофаза, h – мезор, p – коэффициент роста ряда.

Для нахождения минимума функции (1) необходимо ввести частные производные парной регрессии $x = A \cos \varphi$ и $y = A \sin \varphi$ при которых сумма квадратов отклонений фактических значений от теоретических минимальна ($\sum (y_i - \hat{y})^2 \rightarrow \min$):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = \sum_{i=1}^m [x \cos(\omega_0 t_i)^2 + y \sin(\omega_0 t_i) + h \cos(\omega_0 t_i) + p t_i \cos(\omega_0 t_i) - U_i \cos(\omega_0 t_i)] = 0, \\ \frac{dy}{dt} = \sum_{i=1}^m [\cos(\omega_0 t_i) + y \sin(\omega_0 t_i)^2 + h \sin(\omega_0 t_i) + p t_i \sin(\omega_0 t_i) - U_i \sin(\omega_0 t_i)] = 0, \\ \frac{dh}{dt} = \sum_{i=1}^m [x \cos(\omega_0 t_i) + y \sin(\omega_0 t_i) + h + p t_i - U_i] = 0, \\ \frac{dp}{dt} = \sum_{i=1}^m [x t_i \cos(\omega_0 t_i) + y t_i \sin(\omega_0 t_i) + h t_i + p t_i^2 - U_i t_i] = 0. \end{array} \right. \quad (2)$$

Амплитуда теоретического временного ряд количества отказов карьерных самосвалов рассчитывается по формуле:

$$A = \sqrt{x^2 \times y^2}. \quad (3)$$

Акрофаза рассчитывается так:

$$\varphi = \begin{cases} \arctg\left(\frac{y}{x}\right) \text{ при } x \geq 0, \\ \arctg\left(\frac{y}{x}\right) + \pi, \text{ при } x < 0. \end{cases} \quad (4)$$

Далее определяется среднеквадратическое отклонение эмпирического временного ряда количества отказов карьерных самосвалов:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (U_i - U_{cp})^2}{m-1}}, \quad (5)$$

где U_i , U_{cp} – отдельные и среднеарифметическое значение эмпирического временного ряда количества отказов карьерных самосвалов, m – количество данных в ряду.

Модель дополнена квадратом множественного коэффициента корреляции Пирсона (R^2):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (U_i - U_i(t_i))^2}{\sum_{i=1}^m (U_i - U_{cp})^2}, \quad (6)$$

где $U_i(t_i)$ – расчетные значения количества отказов.

Коэффициент R^2 показывает долю дисперсии зависимой переменной y относительно среднего значения, которая происходит из-за влияния переменной x . Его значения находится в диапазоне от 0 до 1. В данном исследовании R^2 является оценкой тесноты связи между эмпирическим и теоретическим временным рядом количества отказов карьерных самосвалов. Чем ближе значение R^2 к 1 (единице), тем выше зависимость количества отказов от влияющих факторов - срока эксплуатации и времени года.

В ранее известной математической модели проверка наличия зависимости производится путем сравнения величин доверительного интервала δ и амплитуды A , что приводит к сужению границ проверки (рис. 7). Поэтому условие заменено. A теоретического временного ряда количества отказов не должна превышать σ эмпирического временного ряда. Если $A > \sigma$, то периодичность количества отказов не соответствует календарному году, что можно проверить, изменив период динамического ряда.

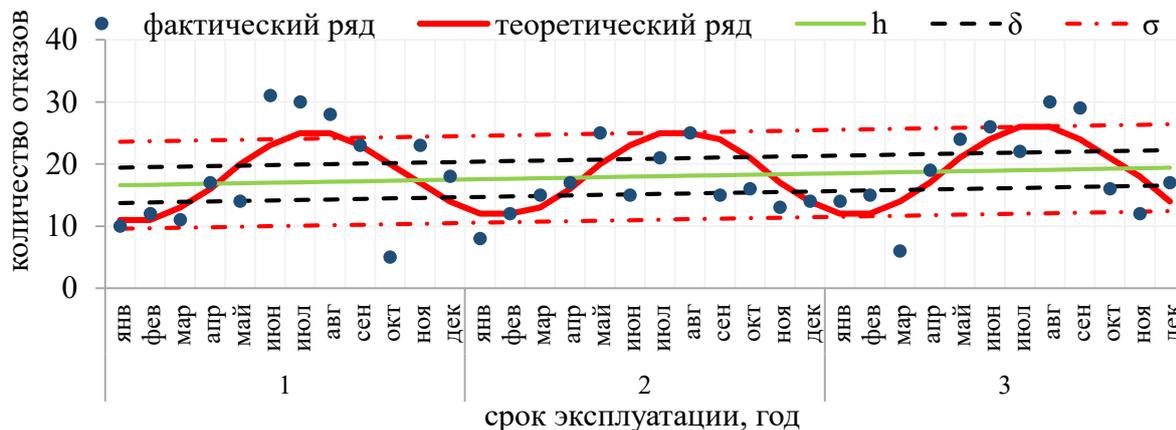


Рисунок 7 – Границы δ и σ для синусоиды

Математическая модель реализована в Mathcad. Вычисления в программе «Анализ временных рядов количества отказов» показали, что количество отказов узлов и агрегатов карьерных самосвалов зависит от времени года и срока эксплуатации (рис. 8).

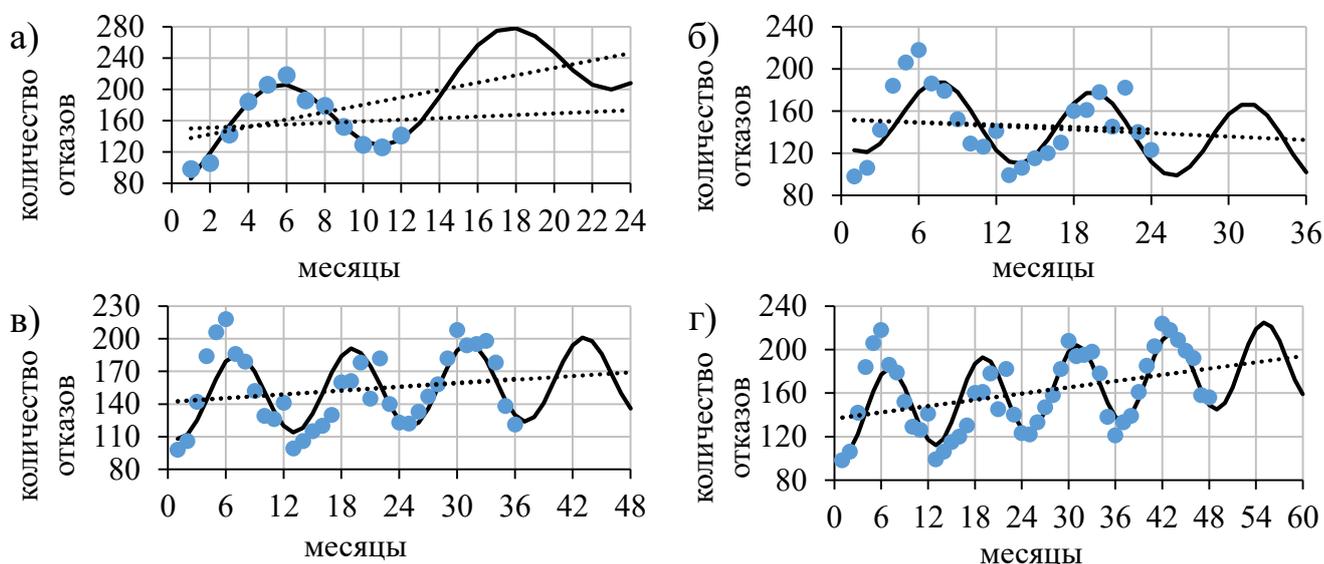


Рисунок 8 – Прогнозируемое количество отказов узлов и агрегатов карьерных самосвалов БелАЗ-7540, рассчитанное по данным за: а) 1 год, б) 2 года, в) 3 года, г) 4 года

Видно, что если использовать временной ряд количества отказов за один год, то тренды фактического и торического ряда не совпадают по уровню. При использовании данных за 2 года из-за уменьшения количества отказов во второй год тренд получается убывающим. Наилучшее совпадение трендов по уровню достигается при использовании данных о количестве отказов не менее, чем за 3 года. Средняя абсолютная процентная ошибка расчета по данным за один год - 34% (точность удовлетворительная), два года - 30% (удовлетворительная), три года - 10% (высокая), четыре года - 3,9% (высокая). Высокая точность прогноза количества отказов обеспечивается при использовании данных не менее чем за три года эксплуатации.

Оценка полученных результатов расчета выполнена сопоставлением прогнозного и фактического временного ряда количества отказов узлов и агрегатов карьерных самосвалов за 4 и 5 год эксплуатации (рис. 9). Сезонные

динамики фактического и прогнозируемого количества отказов узлов и агрегатов карьерных самосвалов за четвертый и пятый год работы совпадают.

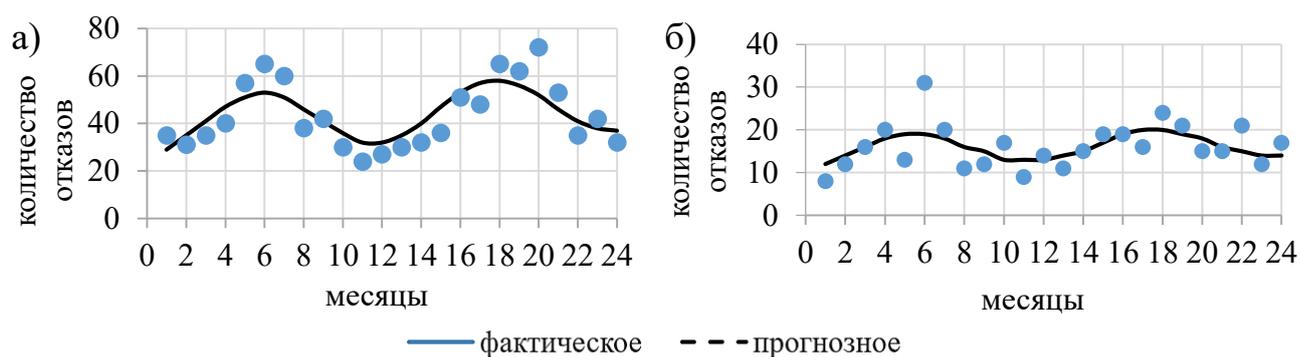


Рисунок 9 – Графики прогнозируемого и фактического количества отказов подвески (а) и трансмиссии (б) карьерных самосвалов БелАЗ-7540

Проверка адекватности математической модели выполнена по критерию Фишера, а точность прогноза по средней процентной и средней абсолютной процентной ошибке. Критерий Фишера показал, что между эмпирическим и теоретическим распределением существенных различий нет. Средняя абсолютная процентная ошибка прогноза количества отказов подвески, ходовой части менее 10%, двигателей, трансмиссии, тормозных систем, систем управления – 10-20%, остальных узлов и агрегатов – 20-50%.

Зависимость по узлам и агрегатам различается. Для передней оси $R^2=0,588$, ведущего моста $R^2=0,628$, ходовой части $R^2=0,744$, тормозных систем $R^2=0,504$, рулевого управления ($R^2=0,449$), подвески $R^2=0,779$, опрокидывающего механизма $R^2=0,411$. Отказы трансмиссии, колес, электрооборудования, кабины, грузовой платформы, двигателя и его систем смазки, питания, выпуска отработавших газов, охлаждения не может быть объяснена только влиянием времени года и срока эксплуатации, т.к. в среднем $R^2=0,2$.

Способ прогнозирования количества отказов карьерных самосвалов, позволяющий выявить сезонную зависимость отказов их узлов и агрегатов внедрен в АО «Алмазы Анабара».

Вышеизложенное является обоснованием второго выносимого на защиту научного положения, а именно: использование математической модели, представленной системой дифференциальных уравнений четвертого порядка позволяет установить функциональную связь между количеством отказов карьерных автосамосвалов, временем года и сроком эксплуатации, а также выполнять их прогнозирование со средней абсолютной процентной ошибкой не более 20%.

В существующих методиках расчет коэффициентов корректировки производится делением различных критериев, характеризующих как условия работы, так и показатели надежности на значения, принятые за базовые.

Количество отказов за период времени - год, время года, срок службы, является критерием с помощью, которого можно оценить условия эксплуатации. Поэтому, влияющие факторы при разработке россыпных месторождений криолитозоны предлагается учитывать коэффициентами K_1 и K_2 :

$$T_{TO} = T_{TO}^{\text{баз}} \times K_1 \times K_2, \text{ моточас} \quad (8)$$

где $T_{TO}^{\text{баз}}$ – периодичность технического обслуживания по регламенту, моточас;
 K_1 и K_2 – коэффициенты являющиеся интегральными показателями, характеризующими увеличение количества отказов карьерных самосвалов в зависимости от времени года и срока эксплуатации.

Коэффициент K_1 это интегральный показатель тенденции повышения количества отказов карьерных самосвалов с увеличением срока эксплуатации. Его предлагается определять следующим образом:

$$K_1 = \frac{N_1}{N_i}, \quad (9)$$

где N_1 , N_i – прогнозируемое количество отказов карьерных самосвалов за первый и планируемый год работы.

Коэффициент K_2 это интегральный показатель увеличения количества отказов карьерных самосвалов в теплое время года. Его предлагается определять так:

$$K_2 = \frac{N_{\text{ср.год}}}{N_{\text{ср.теп}}}, \quad (10)$$

где $N_{\text{ср.год}}$, $N_{\text{ср.теп}}$ – среднее количество отказов карьерных самосвалов за планируемый год работы и теплое время года.

Наработка до капитального ремонта корректируется, следующим образом:

$$T_{KP} = T_{KP}^{\text{баз}} \times K_{\text{рем1}} \times K_{\text{рем2}}, \text{ моточас} \quad (11)$$

где $T_{KP}^{\text{баз}}$ – наработка до капитального ремонта, моточас, $K_{\text{рем1}}$, $K_{\text{рем2}}$ – коэффициенты корректировки периодичности ремонтов.

Коэффициенты $K_{\text{рем1}}$, $K_{\text{рем2}}$ определяются так:

$$K_{\text{рем1,2}} = \frac{\sum K_{1,2}}{T}, \quad (3.14)$$

где $\sum K_{1,2}$ – сумма коэффициентов K_1 и K_2 за срок службы T .

Предлагаемая методика имеет отличительную особенность от существующих, которая заключается в использовании меньшего объема данных, в отсутствии необходимости учета категории условий эксплуатации.

В таблице 1 приведено количество отказов карьерных самосвалов, полученное с помощью программы для ЭВМ «Анализ временных рядов количества отказов» и расчетные значения коэффициентов корректировки периодичности технического обслуживания и ремонта.

Таблица 1 - Коэффициенты корректировки периодичности технического обслуживания карьерных самосвалов

срок эксплуатации	время года										K_1	K_2	$K_{рем1}$	$K_{рем2}$
	холодное					теплое								
	1	2	3	11	12	5	6	7	8	9				
	Количество отказов													
1	87	98	117	116	106	160	173	176	169	153	1,00	0,82	0,91	0,85
2	106	117	136	135	125	179	193	196	188	172	0,95	0,83		
3	125	136	155	155	144	198	212	215	207	191	0,90	0,85		
4	145	156	175	174	164	218	231	234	226	210	0,87	0,86		
5	164	175	194	193	183	237	250	253	245	229	0,84	0,87		

Из таблицы видно, что значения коэффициента K_1 с увеличением срока эксплуатации уменьшаются, а коэффициента K_2 увеличиваются. Коэффициент K_2 показывает, что количество отказов за теплое время года имеет тенденцию к повышению с увеличением срока эксплуатации по сравнению с каждым предыдущим, хоть и слабо прослеживается.

В таблице 2 приведены расчетные значения периодичности профилактических работ карьерных самосвалов в зависимости от срока их эксплуатации.

Таблица 2 – Скорректированная периодичность технического обслуживания и ремонта карьерных самосвалов, моточас

Вид работ	Срок эксплуатации				
	1	2	3	4	5
ТО-1	205	197	191	187	183
ТО-2	410	394	382	374	366
ТО-3	820	788	764	748	732
ПР-1	3094				
ПР-2	6188				
КР	11602				

На основе сравнительного анализа количества мероприятий каждого вида работ при периодичности работ по регламенту для эталонных условий эксплуатации и при скорректированной периодичности установлено, что объем работ больше на 39%.

Производственная проверка методики корректировки периодичности технического обслуживания и ремонта карьерных самосвалов, используемых при разработке россыпных месторождений криолитозоны выполнена в АО «Алмазы Анабара» на прииске Маят. Для пяти единиц карьерных самосвалов БелАЗ-7540 периодичность технического обслуживания была скорректирована коэффициентами $K_1=1,0$ и $K_2=0,82$. Периодичность технического обслуживания ТО-1 составила 205 моточасов, ТО-2 - 410, ТО-3 - 820.

Анализ достигнутого технического результата выполнен путем сравнения количества отказов карьерных самосвалов, находящихся в эксплуатации без корректировки периодичности технического обслуживания и карьерных самосвалов периодичность технического обслуживания, которых была изменена. Определено, что количество отказов карьерных самосвалов, обслуживаемых чаще меньше на 32%.

На основе, разработанной методики прогнозирования количества отказов и полученных данных о продолжительности ремонтов планируемый объем работ

по ремонту карьерных самосвалов можно определить, следующим образом:

$$T_{\text{рем}} = n_{\text{отк}} \times T_{\text{ср.в}}, \text{ час} \quad (12)$$

где $n_{\text{отк}}$ – количество отказов, $T_{\text{ср.в}}$ – среднее восстановления, час.

На устранение одного отказа карьерных самосвалов БелАЗ-7540 за 5 лет эксплуатации в среднем затрачивалось 1,66 часа. Количество отказов до корректировки 631, после 432. Тогда продолжительность устранения отказов до корректировки составляет:

$$T_{\text{рем.до}} = 631 \times 1,66 = 1047 \text{ часа}$$

После корректировки при сохранении продолжительности устранения одного отказа равной среднестатистической:

$$T_{\text{рем.после}} = 432 \times 1,66 = 717 \text{ часов}$$

Простои в неплановых ремонтах меньше на 330 часов за год, что составляет 32% от времени простоев в ремонте до корректировки. Уменьшение периодичности технического обслуживания привело к увеличению количества работ и трудоемкости на 22% за год (табл. 3).

Таблица 3 - Трудоемкость технического обслуживания из расчета на один самосвал, чел-час

Вид работ	Количество до корректировки	Количество после корректировки	Трудоемкость по видам работ	Общая до корректировки	Общая после корректировки
ТО-1	8	9	13	104	117
ТО-2	4	5	32	128	160
ТО-3	3	4	49	147	196
Итого	15	18		379	473

Всего в эксплуатации находится 20 единиц самосвалов БелАЗ-7540. Если экстраполировать, полученные данные на 20 машин, то полученную продолжительность ремонтов нужно умножить на 4 и трудоемкость технического обслуживания на 20. Необходимое количество слесарей до корректировки:

$$N_{\text{сл}} = \frac{T_{\text{то}} + T_{\text{рем}}}{T_{\text{н.раб}}} = \frac{4 \times 1047 + 20 \times 379}{1570} = 8 \text{ слесарей} \quad (13)$$

где $T_{\text{то}}$, $T_{\text{рем}}$ - трудоемкость технического обслуживания и ремонта, чел-ч; $T_{\text{н.раб}}$ – норма рабочего времени слесаря (1570 часа в год), час.

Необходимое количество слесарей после корректировки:

$$N_{\text{сл}} = \frac{4 \times 717 + 20 \times 473}{1570} = 8 \text{ слесарей}$$

Из этого следует, что потребности в увеличении количества слесарей для выполнения работ по техническому обслуживанию и ремонту практически не возникнет. При обеспечении средней часовой производительности карьерных самосвалов в 70 м³/ч дополнительная выработка на 20 машин составит:

$$V_{\text{доп}} = Q_{\text{сам}} \times \Delta T_{\text{доп}} \times 4 = 70 \times 330 \times 4 = 92400 \text{ м}^3 \quad (14)$$

где $Q_{\text{сам}}$ – часовая производительность карьерных самосвалов, м³/ч; $\Delta T_{\text{доп}}$ – дополнительное производительное время работы карьерных самосвалов ($T_{\text{рем.до}} - T_{\text{рем.после}}$), ч.

Количество машин может быть уменьшено на 1 единицу (годовая выработка одного БелАЗа-7540 равна 72 800 м³), что приведет к сокращению 2 водителей. Среднемесячная зарплата водителя карьерного самосвала равна 232,5 тыс. руб, а продолжительность работы на участке - 8 месяцев в году. Расчетный экономический эффект составляет 3,720 млн руб в год, который достигается за счет экономии на зарплате водителей. Методика корректировки периодичности технического обслуживания и ремонта внедрена в АО «Алмазы Анабара».

Вышеизложенное является обоснованием третьего выносимого на защиту научного положения, а именно: периодичность технического обслуживания и ремонта карьерных автосамосвалов при разработке россыпных месторождений криолитозоны для сокращения количества отказов следует уменьшать по мере увеличения срока службы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научно-практическая задача по повышению эффективности эксплуатации технологического транспорта россыпных месторождений криолитозоны за счет корректировки периодичности технического обслуживания и ремонта карьерных самосвалов на основе установленной зависимости, связывающей количество отказов карьерных самосвалов, время года и срок эксплуатации.

Основные выводы и результаты диссертационного исследования заключаются в следующем:

1. Выявлено, что производительность карьерных самосвалов и их удельный расход топлива при разработке россыпных месторождений криолитозоны имеют выраженную сезонную зависимость. В теплое время года производительность машин в 1,5 и более раз ниже, удельный расход топлива в 1,7 раза выше, чем в холодное время года при равных расстояниях транспортировки и среднесменных пробегах.

2. Определено, что при разработке россыпных месторождений криолитозоны открытым способом количество отказов ходовой части карьерных самосвалов в теплое время года в 2 раза больше, чем за аналогичный период холодного времени года, что обусловлено влиянием дорожных условий, значимость, которых в 2 раза выше, чем срок эксплуатации, природно-климатические и организационные факторы.

3. Проведен анализ системы технического обслуживания и ремонта карьерных самосвалов, методик корректировки ее периодичности и выявлено, что в положениях установлены одни и те же нормативы для машин разной грузоподъемности, хотя их безотказность различается. Специфика условий эксплуатации технологического транспорта промышленных предприятий учитывается коэффициентами, которые определяются посредством деления эмпирически зафиксированной величины, характеризующей техническое состояние машины на ее регламентированное нормативное значение.

4. Усовершенствованная математическая модель позволяет выявить сезонную закономерность отказов карьерных самосвалов при разработке россыпных месторождений криолитозоны открытым способом и прогнозировать

их количество с высокой точностью (средняя абсолютная процентная ошибка не более 20%).

5. Разработанная методика корректировки периодичности технического обслуживания и ремонта карьерных самосвалов коэффициентами, характеризующими повышение количества их отказов в зависимости от времени года и срока службы с постепенным уменьшением интервалов профилактических мероприятий с увеличением срока службы машин при разработке россыпных месторождений криолитозоны открытым способом, отличающаяся от существующих использованием меньшего объема данных, отсутствием необходимости учета категории условий эксплуатации, позволяет уменьшить количество отказов.

6. Установлено, что количество отказов карьерных самосвалов при разработке россыпных месторождений криолитозоны открытым способом можно понизить за счет сокращения периодичности технического обслуживания и ремонта коэффициентами, характеризующими тенденцию увеличения количества отказов машин в зависимости от времени года и срока их эксплуатации. Расчетный экономический эффект составляет 3,72 млн руб. в год. Полученные результаты внедрены в АО «Алмазы Анабара».

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих печатных работах:

- в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Бочкарев, Ю. С. Анализ эффективности эксплуатации автосамосвалов БелАЗ-7540 (на примере ОАО «Алмазы Анабара») / Ю. С. Бочкарев, М. А. Викулов, Г. П. Довиденко, И. И. Седалищев // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — № 9. — С. 394–397.

2. Бочкарев, Ю. С. Влияние условий эксплуатации на работоспособность автосамосвалов БелАЗ-7540 / Ю. С. Бочкарев, А. М. Ишков, М. А. Викулов // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2015. — № 7 (102). — С. 155–163.

3. Бочкарев, Ю. С. Исследование эксплуатации автосамосвалов БелАЗ-7540 в условиях Севера / Ю. С. Бочкарев, М. А. Викулов, А. М. Ишков, И. И. Седалищев // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 7. — С. 151–157.

4. Бочкарев, Ю. С. Оценка безотказности автосамосвалов БелАЗ-7540 при освоении запасов россыпных месторождений Севера / Ю. С. Бочкарев, М. М. Бояров // Горное оборудование и электромеханика. — 2020. — № 1 (147). — С. 10–15. — DOI: 10.26730/1816-4528-2020-1-10-15.

5. Бочкарев, Ю. С. Факторы, лимитирующие безотказность автосамосвалов БелАЗ-7540 на россыпных месторождениях Севера / Ю. С. Бочкарев, М. М. Бояров // Горное оборудование и электромеханика. — 2020. — № 1 (147). — С. 16–22. — DOI: 10.26730/1816-4528-2020-1-16-22.

- в научных изданиях, входящих в наукометрическую базу данных Scopus:

6. Бочкарев, Ю. С. Повышение эффективности эксплуатации карьерных автосамосвалов при разработке россыпных месторождений Севера / Ю. С.

Бочкарев, И. В. Зырянов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5-2. — С. 80–90.

7. Бочкарев, Ю. С. Надежность карьерных самосвалов при разработке россыпных месторождений в криолитозоне / Ю. С. Бочкарев, И. В. Зырянов // Горный журнал. — 2022. — № 4. — С. 102–106.

- в научных изданиях, входящих в наукометрическую базу данных *Web of Science*:

8. Bochkaryov, Y. S. Operating efficiency of BelAZ-7540 dump trucks under conditions of North / Y. S. Bochkaryov, A. M. Ishkov, D. E. Makhno // AER-Advances in Engineering Research. — 2017. — Vol. 133. — P. 269–274.

9. Бочкарев, Ю. С. Стабилизация работы парка горно-транспортных машин на россыпных месторождениях в криолитозоне / Ю. С. Бочкарев, И. В. Зырянов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2022. — № 4. — С. 193–203.

10. Bochkaryov, Yu. The operational reliability of quarry dump trucks BELAZ-7540 in the placer deposits / Yu. Bochkaryov, A. Ishkov // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020 : proceedings. — Sofia : СТЕФ92 Технолоджи, 2020. — P. 325–332. — DOI: 10.5593/sgem2020/1.2/s03.042.

- в других изданиях, входящих в наукометрическую базу данных *РИНЦ*:

11. Бочкарев, Ю. С. О периодичности технического обслуживания автосамосвалов БелАЗ-7540 / Ю. С. Бочкарев // Совершенствование технологии горных работ и подготовка кадров для обеспечения техносферной безопасности в условиях Северо-Востока России : сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. — Якутск : Изд-во СВФУ, 2018. — С. 325–332.

12. Бочкарев, Ю. С. Повышение эффективности использования карьерных автосамосвалов при разработке россыпных месторождений / Ю. С. Бочкарев, И. В. Зырянов // Горнодобывающая промышленность в 21 веке: вызовы и реальность : сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции (Мирный, 2021). — М. : Перо, 2021. — С. 27–28.

13. Бочкарев, Ю. С. Эксплуатация горно-транспортных машин на карьерах Севера : учебное пособие / А. М. Ишков, М. А. Викулов, Ю. С. Бочкарев. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : ИНФРА-М, 2021. — 201 с.

14. Бочкарев, Ю. С. Исследование сезонной динамики отказов карьерных самосвалов при эксплуатации на россыпных месторождениях в криолитозоне / Ю. С. Бочкарев, И. В. Зырянов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XXI Междунар. науч.-практ. конф. (Екатеринбург, 2023). — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2023. — С. 399–403.

15. Бочкарев, Ю. С. Методика корректировки периодичности технического обслуживания и ремонта карьерных самосвалов при освоении россыпных месторождений криолитозоны / Ю. С. Бочкарев // Наука и инновационные разработки - Северу : сборник материалов III Междунар. науч.-практ. конф. (Москва, 2024). — Москва: ООО "Издательство "Спутник+", 2024. — С. 42–46.