https://doi.org/10.18503/SMTS-2022-12-2-12-24

ISSN 2949-0952 (Print)

УДК 622.68:658.58

АНАЛИЗ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ И ДИНАМИКИ ПРОСТОЕВ АВТОМОБИЛЕЙ БелАЗ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Тотьмянин С.В.[1]*

[1] Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», гор. Москва, Россия
* Контактное лицо: skr-on@mail.ru

Аннотация. Исследуется влияние различных эксплуатационных показателей парка карьерных самосвалов на величину эксплуатационных затрат на техническое обслуживание и ремонт. Обсуждается проблема достоверности и полноты регистрируемых исходных данных. Выявлены зависимости затрат от времени простоев карьерных самосвалов. Определены параметры законов распределения эксплуатационных показателей автосамосвалов на действующем горнодобывающем предприятии в течение 2019–2021 гг. Выполнен корреляционный анализ влияния показателей работы автопарка на эксплуатационные затраты. Корреляционный анализ производился с использованием метода ранговой корреляции Спирмена и парной корреляции Пирсона. Результаты корреляционного анализа показали наличие относительно сильного влияние на эксплуатационные затраты только показателя «Трудоёмкость ремонтных работ», что объясняется большими материальными затратами на выполнение более трудоёмких работ. Сделан вывод о необходимости выявления дополнительных факторов, влияющих на величину эксплуатационных затрат на содержание парка автосамосвалов, а также использования более точных методов предсказательной аналитики, в том числе, для установления возможной нелинейной связи между эксплуатационными показателями и затратами.

Ключевые слова: карьерный самосвал, корреляция, ранговая корреляция Спирмена, парная корреляция Пирсона, закон распределения, нормальное распределение, эксплуатационные показатели, эксплуатационные затраты

© Тотьмянин С.В., 2022

Поступила: 15 ноября 2022; Принята к публикации: 4 декабря 2022; Опубликована: 30 декабря 2022

Для цитирования:
Тотьмянин С.В. Анализ интенсивности отказов и динамики простоев автомобилей БелАЗ горнодобывающего предприятия // Недропользование и транспортные системы. 2022. Т.12. №2. С.12–24. https://doi.org/10.18503/SMTS-2022-12-2-12-24

Это произведение доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

https://doi.org/10.18503/SMTS-2022-12-2-12-24

ISSN 2949-0952 (Print)

ANALYSIS OF THE FAILURE RATE AND DOWNTIME DYNAMICS OF BelAZ TRUCK AT A MINING ENTERPRISE

Sergey Totmyanin[1]*

[1] National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia
* Corresponding: skr-on@mail.ru

Abstract. The influence of various operational indicators of the fleet of mining dump trucks on the value of operating costs for their maintenance and repair is investigated. The problem of reliability and completeness of the registered initial data is discussed. The dependence of costs on the downtime of mining dump trucks are revealed. The parameters of the laws of distribution of operational indicators of dump trucks at an operating mining enterprise during 2019–2021 were determined. A correlation analysis of the influence of the vehicle fleet performance indicators on operating costs was performed. Correlation analysis we performed using Spearman's rank correlation and Pearson's pair correlation methods. The results of the correlation analysis showed the presence of a relatively strong influence on the operating costs of only the indicator "Labor intensity of repair work", which is explained by the large material costs for more labor-intensive work. We concluded that it is necessary to identify additional factors that affect the amount of operating costs for maintaining a fleet of dump trucks. In addition, the use of more accurate methods of predictive analytics is required, including to establish a possible non-linear relationship between operational indicators and costs.

Keywords: mining truck, correlation, Spearman's rank correlation, Pearson's pair correlation, distribution law, normal distribution, performance indicators, operating costs

© Totmyanin S., 2022

Received: November 15, 2022; Accepted: December 4, 2022; Published: December 30, 2022

For citation:
Totmyanin S. Analysis of the Failure Rate and Downtime Dynamics of BelAZ Truck at a Mining Enterprise // Subsurface Management and Transportation Systems. 2022, Vol. 12, No. 2, pp. 12-24. https://doi.org/10.18503/SMTS-2022-12-2-12-24

The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Введение

С увеличением глубины отработки месторождения повышаются затраты на транспортирование горной массы и её себестоимость. Доля расходов на карьерный транспорт в общей стоимости добычи полезного ископаемого в настоящее время составляет 50%, достигая на глубоких карьерах 70%. Эффективность использования традиционных видов карьерного транспорта – железнодорожного и автомобильного – значительно снижается при глубинах отработки 150–200 м.

Основу карьерного транспорта составляют самосвалы. Самосвалы имеют несомненные преимущества перед конвейерным транспортом в условиях транспортировки горных пород с разными физико-механическими свойствами.

Использование автосамосвалов, в отличие от железнодорожного транспорта, обеспечивает упрощение процесса отвалообразования. Кроме того, есть возможность передвигаться по относительно крутым (4...5° или 80...100‰) подъёмам автомобильных дорог, что позволяет сокращать длину транспортных коммуникаций. Основные недостатки автотранспорта – это цикличность (как следствие, наличие порожних пробегов), зависимость от состояния дорог, снижение производительности при неблагоприятных дорожных условиях, загрязнение атмосферы отработавшими газами, большая энергоёмкость и значительные эксплуатационные затраты [1–5].

Одной из основных статей затрат горнодобывающего предприятия, эксплуатирующего автомобильный транспорт, являются затраты на поддержание автомобилей в технически исправном состоянии и восстановление их после отказов.

Поэтому одной из главных задач горнодобывающего предприятия является совершенствование системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР), повышение эффективности технической эксплуатации автомобильного транспорта по следующим основным направлениям:

1. совершенствование системы ТОиР;
2. повышение квалификации ремонтного персонала;
3. совершенствование системы материально-технического снабжения;
4. использование последних достижений науки и техники.

В настоящем исследовании выполнен анализ законов распределения эксплуатационных показателей парка автосамосвалов горнодобывающего предприятия, а также определены корреляционные зависимости эксплуатационных затрат на ТОиР и эксплуатационных показателей.

2. Данные и методы

На большинстве предприятий, добывающих полезные ископаемые, для контроля показателей использования оборудования применяются MES- и ERP-системы. MES-системы [6], в большинстве случаев, являются источником данных для ERP-систем [7].

В нашем исследовании использованы данные, полученные на одном из горнодобывающих предприятий России. По данным MES-системы получены технические показатели использования автомобильного транспорта, а также значения фактической продолжительность простоев автомобилей в ремонте. С использованием ERP-системы получены данные о затратах на ТОиР. Все данные представлены в виде файлов в формате электронных таблиц.

В исследовании использовались методы описательной статистики и корреляционного анализа. Обработка статистических данных и визуализация результатов производилась с использованием библиотек языка программирования Python версии 3.10 [8] Pandas (Python Data Analysis Library) [9], NumPy [10], Seaborn (Statistical Data Visualization) [11], Matplotlib (Visualization with Python) [12].

2. Результаты

В процессе эксплуатации парка автосамосвалов на горнодобывающих предприятиях происходит списание автомобилей, которые восстанавливать до технически исправного состояния посредством ремонтов становится экономически невыгодным. Парк самосвалов пополняется новыми автомобилями.

Согласно [13], жизненный цикл объекта состоит из ряда стадий: проектирование, изготовление и эксплуатация объекта. Каждая из этих стадий жизненного цикла влияет на надёжность изделия. Надёжность объекта на стадии эксплуатации иллюстрируется графиком зависимости интенсивности отказов объекта от времени эксплуатации (**рис. 1**).

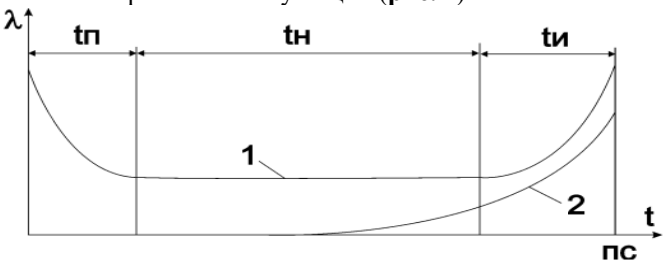


Рис. 1. Зависимость интенсивности отказов λ от времени эксплуатации t:
1 – кривая интенсивности отказов λ(t)
2 – кривая старения; tп – период приработки
tн – период нормальной работа
tи – период износа

Fig. 1. Dependence of the failure rate λ on the operating time t:
1 – failure rate curve λ(t)
2 - aging curve; tp - running-in period
tn - period of normal operation
ti - wear period

Данные об изменении продолжительности простоев самосвалов на исследуемом горнодобывающем предприятии в период 2019–2021 гг. представлены на **рис. 2**. Виден ярко выраженный восходящий тренд суммарной продолжительности устранения отказов. В течение исследуемого периода численность парка автосамосвалов изменялась от 19 до 26 единиц, то

есть парк интенсивно обновлялся. Таким образом, увеличение продолжительности устранения отказов в рассматриваемом периоде объясняется периодом приработки узлов и агрегатов у новых автосамосвалов (**рис. 1**).

Анализ сезонности простоев (**рис. 3–5**) показывает, что 2021 год выделяется наибольшей длительностью простоев по месяцам. Кроме того, длительность простоев в летние месяцы 2020 и 2021 годов больше, по сравнению с 2019 годом. Это мы объясняем увеличением численности автосамосвалов модели БелАЗ 75309 в парке, более жарким летом, а также увеличением плеча откатки.

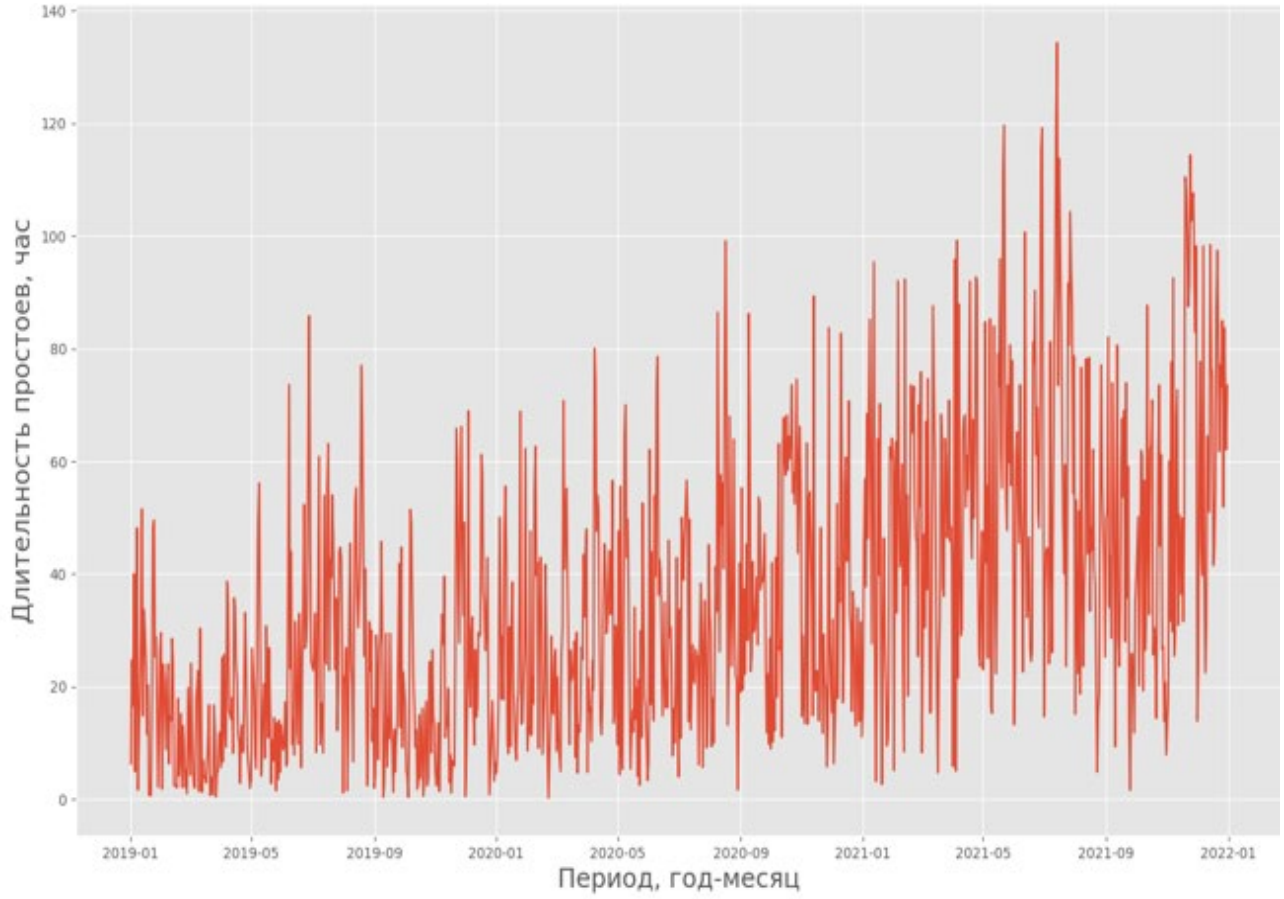


Рис. 2. Динамика суточных простоев автосамосвалов по месяцам 2019–2022 гг.
Fig. 2. Dynamics of daily downtime of dump trucks by months 2019-2022

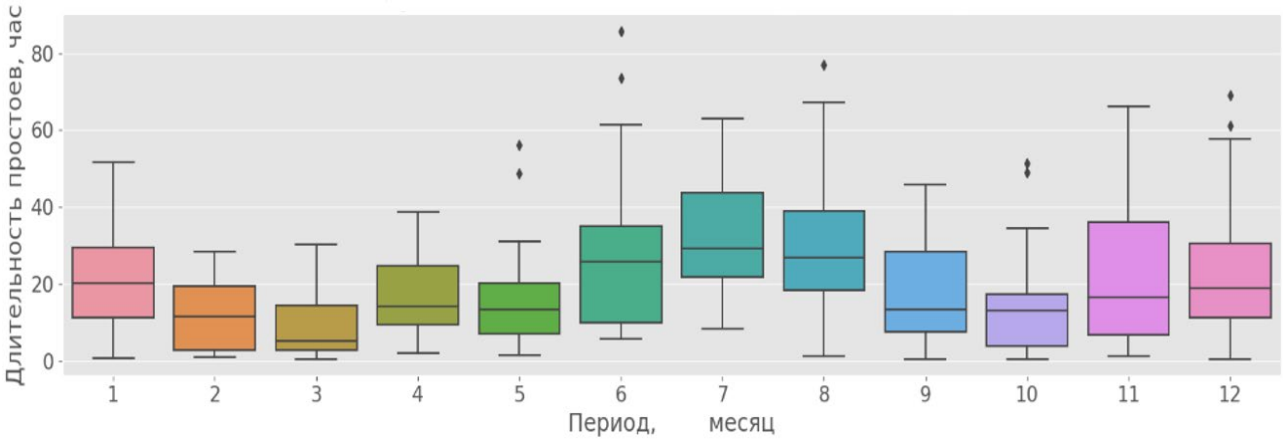


Рис. 3. Динамика простоев автосамосвалов по месяцам 2019 года
Fig. 3. Dynamics of dump trucks downtime by months of 2019

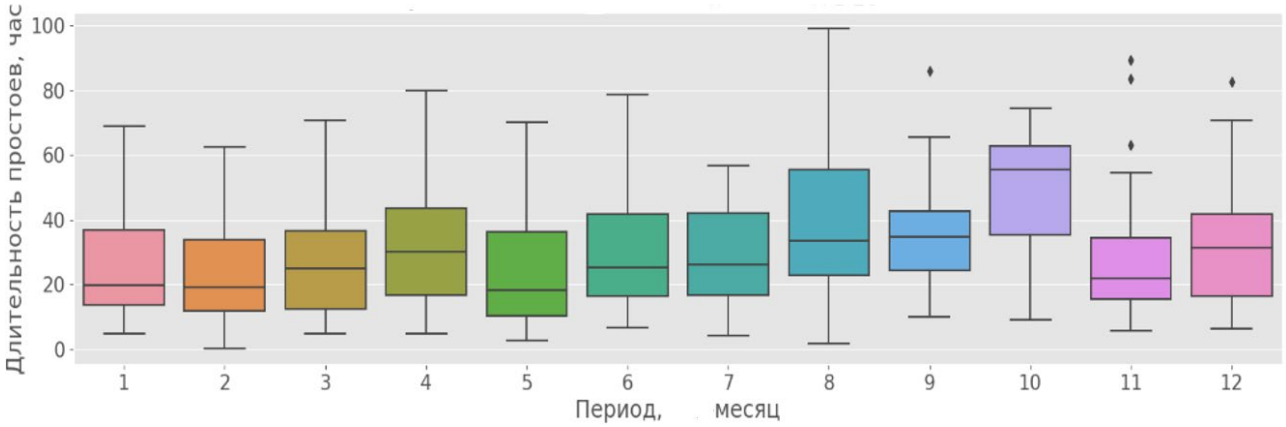


Рис. 4. Динамика простоев автосамосвалов по месяцам 2019 года
Fig. 4. Dynamics of dump trucks downtime by months of 2019

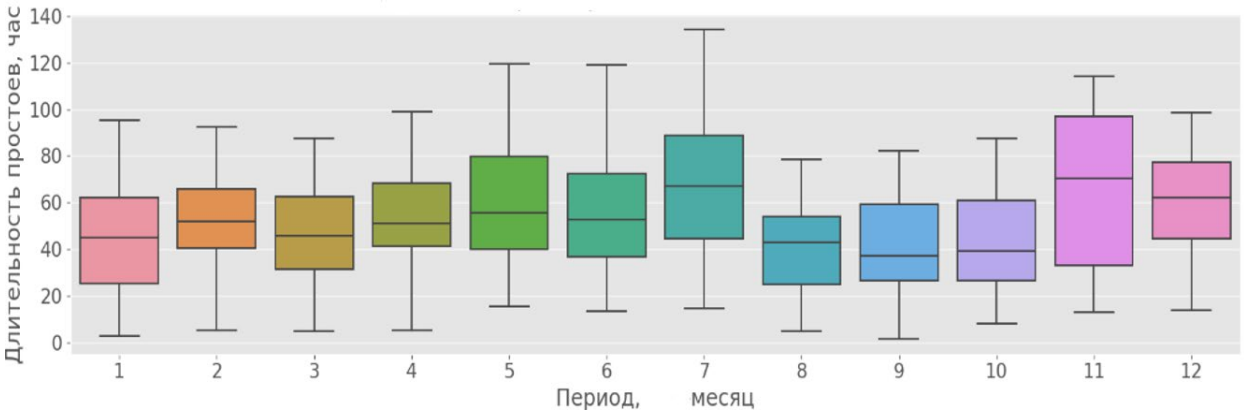


Рис. 5. Динамика простоев автосамосвалов по месяцам 2019 года
Fig. 5. Dynamics of dump trucks downtime by months of 2019

Анализ причин простоев (**рис. Приложение А.1**) позволил установить причины, приведшие к наиболее продолжительным суммарным простоям в течение исследуемого трёхлетнего периода (час):

- перебортировка шин – 4556.53;
- выход из строя механических гарантийных узлов – 3521.30;
- электрооборудование – 2980.35;
- крепёжные работы – 2434.37;
- замена вентиля – 1492.42;
- замена правого редуктора мотор-колеса – 1424.53;
- замена левого редуктора мотор-колеса – 1409.698;
- замена двигателя – 1383.18;
- ремонт заднего центрального узла – 1087.43.

В качестве исходных данных для расчёта описательной статистики эксплуатационных показателей парка автосамосвалов были использованы месячные данные по каждому автосамосвалу. Пример представления исходных данных показан на **рис. 6**. В поле «id» указан год, месяц и гаражный номер автосамосвала. Всего была обработана 771 запись.

	Id	Время простоя, час	Трудоемкость, чел*ч	Затраты, руб	Время на линии, ч	Пробег, км	Количество рейсов, шт	Среднее расстояние, км	Средняя высота, м	Перевезено, т
0	2019_1_1	24.75	441.70	482420.01	426.50	5769.00	1013.00	2.77	108.09	177182.63
1	2019_1_5	83.75	212.30	438098.18	619.00	8730.00	1249.00	3.41	126.68	227295.01
2	2019_1_38	156.42	114.90	4242303.63	535.00	7648.00	1149.00	3.22	129.77	209203.25
3	2019_1_39	7.98	263.50	12843944.46	558.50	8188.00	1168.00	3.42	128.79	212360.49
4	2019_1_40	77.47	183.40	5902041.64	502.50	7301.00	1121.00	3.18	125.00	200347.79

Рис. 6. Пример представления эксплуатационных показателей по автосамосвалам
Fig. 6. Example of reporting dump trucks performance

Таблица 1 – Описательная статистика эксплуатационных показателей автосамосвалов
Table 1. Descriptive statistics on dump trucks performance

Показатель	Время простоя, ч	Трудоёмкость, чел·ч	Затраты, руб.	Время на линии, ч	Пробег, км	Количество рейсов, шт.	Среднее расстояние, км	Средняя высота, м	Перевезено, т
Среднее	50.01	409.93	2619051.76	562.26	8807.74	1211.64	3.59	146.92	230840.7
Стандартное отклонение	55.02	415.20	6212499.75	93.90	1664.91	251.50	0.52	34.77	47995.99
Минимум	0.02	0.02	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25%	17.68	167.30	241090.64	537.00	8157.00	1104.00	3.27	127.15	213055.0
50%	35.87	310.60	576790.15	583.25	9088.50	1232.00	3.56	143.24	235184.82
75%	64.17	520.05	4044530.38	616.50	9849.00	1364.50	3.90	164.42	257786.8
Максимум	490.90	5952.10	115113147.82	672.50	12093.00	2065.00	5.27	242.77	392320.92

Показатель «Время простоя» – это затраты времени на устранение отказов или аварий. Гистограмма распределения значений времени простоя показана на (**рис. 7**). В 50% случаев это время меньше 36 часов. Длительные простои связаны с заменой крупных узлов – двигателей внутреннего сгорания, кузовных платформ и тому подобное. Кроме того, ожидание поставок товарно-материальных ценностей оказывает сильное влияние на продолжительность простоев.

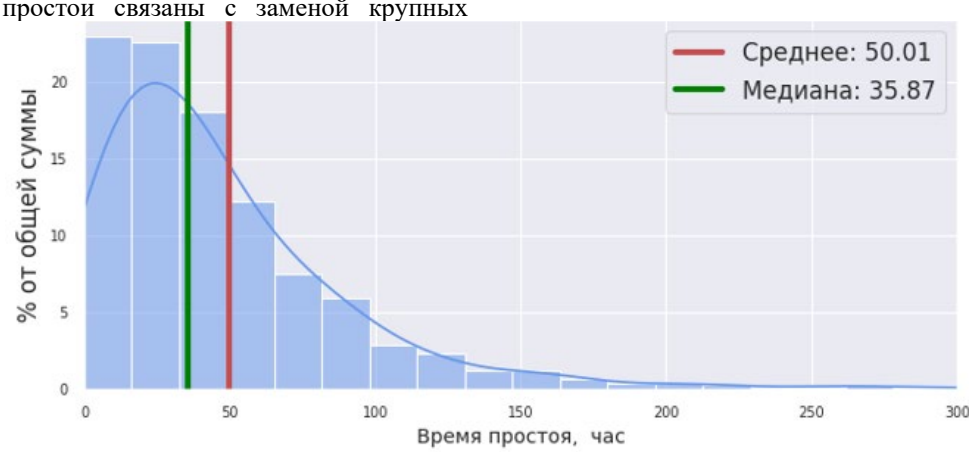


Рис. 7. Гистограмма распределения значений показателя «Время простоя»
Fig. 7. Indicator "Downtime" distribution histogram

Показатель «Трудоёмкость» характеризует затраты трудовых ресурсов, которые были привлечены к устранению отказов. В более 80% случаев трудозатраты принимают значение от 0 до 350 чел·ч (**рис. 8**), при среднем значении трудоёмкости 410 чел·ч. Удлинённая правая часть гистограммы соответствует трудозатратным ремонтам от 2000 до 6000 чел·ч. К таким ремонтам относятся неплановые ремонты по замене двигателей внутреннего сгорания, редукторов мотор-колёс и тому подобное. Разброс значений трудоёмкости довольно большой и составляет 491 чел·ч.

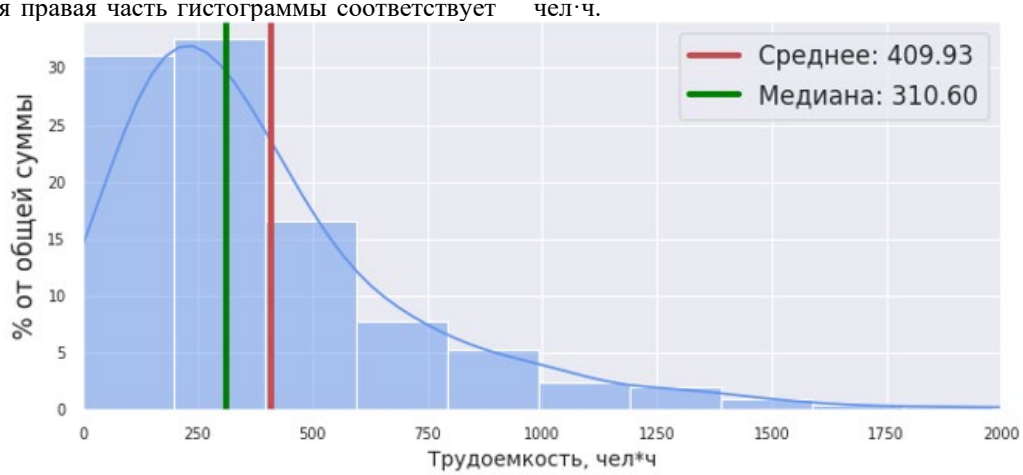


Рис. 8. Гистограмма распределения значений показателя «Трудоёмкость»
Fig. 8. Indicator "Labor intensity" distribution histogram

Гистограмма показателя «Время на линии» смещена вправо (**рис. 9**). Данный показатель характеризует время нахождения оборудования в технически исправном состоянии, когда автомобиль способен выполнять и выполняет транспортную работу. Продолжительность месячной работы самосвалов находится в основном между 400 и 670 ч и в среднем равна 562 ч. Остальные значения соответствуют внеплановым ремонтам или недостоверным данным. Пик распределения находится правее среднего и медианы. Значения ограничены числом часов в месяце – до 744 часов.

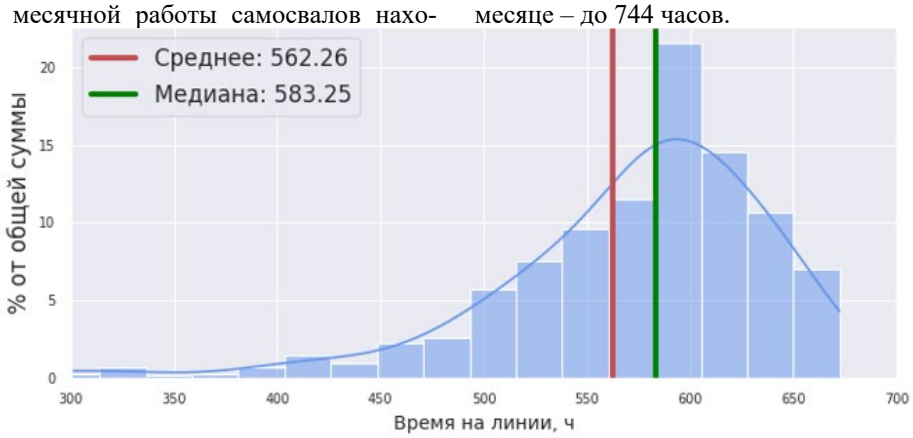


Рис. 9. Гистограмма распределения значений показателя «Время на линии»
Fig. 9. Indicator "Time in work" distribution histogram

Показатель «Пробег» (**рис. 10**) характеризует среднемесячные пробеги самосвалов. Значения этого показателя линейно зависит от расстояния транспортирована (плеча). При дальнейшем анализе может быть исключён из расчётов по причине коллинеарности.

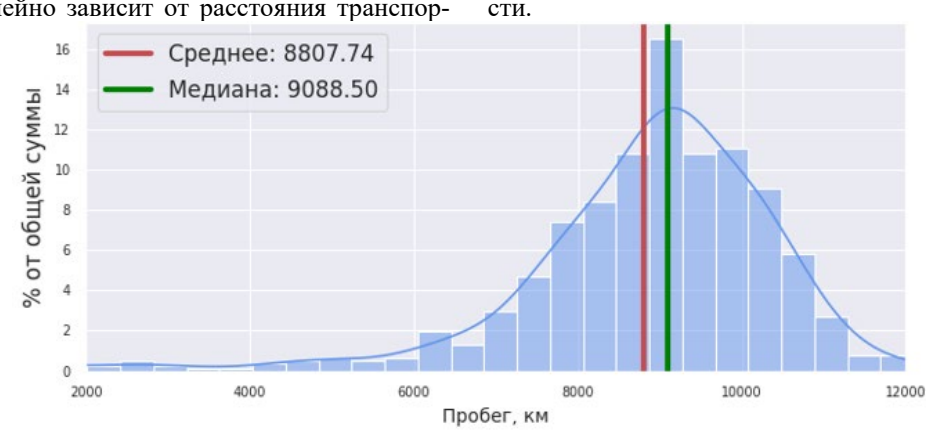


Рис. 10. Гистограмма распределения значений показателя «Пробег»
Fig. 10. Indicator "Monthly mileage" distribution histogram

Гистограмма распределения показателя «Количество рейсов», как и у некоторых предыдущих показателей, по форме похожа на гистограмму нормального распределения (**рис. 11**). Количество рейсов – это количество ездок самосвала от экскаватора до пункта разгрузки перегрузки и обратно. Значение этого показателя зависит от времени нахождения автомобиля на линии.



Рис. 11. Гистограмма распределения значений показателя «Количество рейсов»
Fig. 11. Indicator "Number of dump trucks trips" distribution histogram

Показатель «Перевезено» (**рис. 12**) характеризует фактический объем перевозок в тоннах. Гистограмма распределений значений этого показателя по форме похожа на гистограмму нормального распределения [14]. Значения среднего и медианы достаточно близки, стандартное отклонение равно 47964.85 тонн.

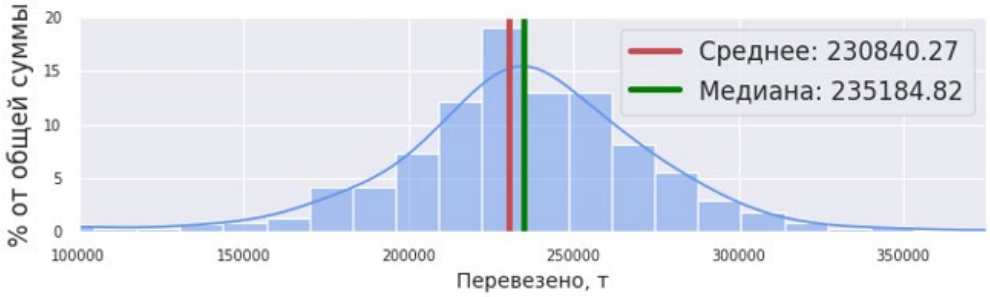


Рис. 12. Гистограмма распределения значений показателя «Перевезено»
Fig. 12. Indicator "Volume of transported cargo" distribution histogram

Показатель «Среднее расстояние» (**рис. 13**) характеризует расстояния транспортирования от экскаватора до пункта разгрузки. На гистограмме распределения значений этого показателя виден второй достаточно заметный пик, что позволяет сделать вывод о бимодальности значений среднего расстояния. Другими словами, данные имеют две (или более) групп, которые различны по своим эксплуатационным характеристикам и на которые влияет расстояние перевозок.

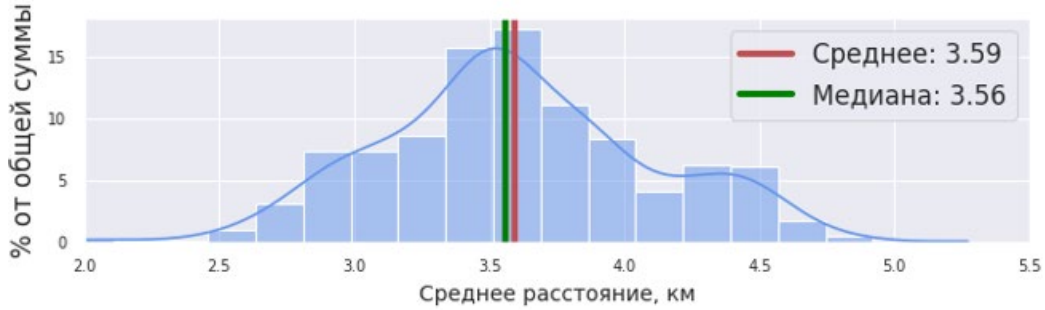


Рис. 13. Гистограмма распределения значений показателя «Среднее расстояние»
Fig. 13. Indicator "Average distance" distribution histogram

«Средняя высота» – это показатель, характеризующий высоту подъёма автомобиля от экскаватора до места разгрузки. Как и расстояние перевозок, признак имеет две моды (**рис. 14**), что позволяет предположить, что имеется, как минимум, две группы самосвалов, работавших на разной высоте и с разным плечом перевозок. Форма гистограммы распределения значений этого показателя также похожа на гистограмму нормального закона распределения.

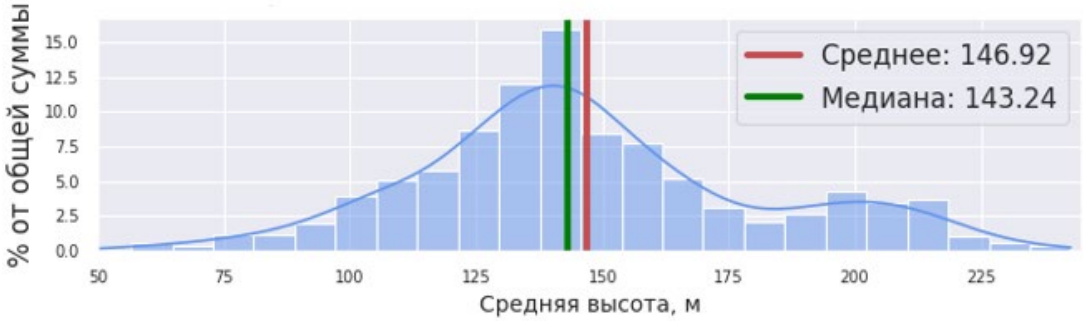


Рис. 14. Гистограмма распределения значений показателя «Средняя высота»
Fig. 14. Indicator "Average transportation height" distribution histogram

Значения показателя «Затраты» в 90% процентах случаев находятся вблизи значения 3 млн рублей в месяц (**рис. 15**). К данным затратам относятся эксплуатационные затраты на заработную плату и материалы. Медианное значение показывает, что 50% затрат не превышает 580 тыс. руб. Разброс между минимальным и максимальным значениями составляет 123144 тыс. руб. Наиболее затратные ремонты крайне редки и связаны с заменой дорогостоящих узлов самосвалов - двигателей, редукторов мотор-колёс, тяговых генераторов и тому подобное.



Рис. 15. Гистограмма распределения значений показателя «Затраты»
Fig. 15. Indicator "Operating costs" distribution histogram

Для оценки связей между исследуемыми показателями были рассчитаны коэффициенты парной корреляции [14]. Расчёт произведён с использованием метода Пирсона (**табл. 2**). Матрицы коэффициентов парной корреляции Пирсона и ранговой корреляции Спирмена представлены на **рис. 16** и **17**.

Таблица 2 – Коэффициенты парной корреляции показателей эксплуатационной работы парка автосамосвалов
Table 2 - Pair correlation of the fleet of dump trucks operational work indicators

Показатель	Время простоя, ч	Трудоём-кость, чел·ч	Затраты, руб.	Время на линии, ч	Пробег, км	Количество рейсов, шт.	Среднее расстояние, км	Средняя высота, м	Перевезено, т
Время простоя, ч	1	0.2598	0.1612	-0.4586	-0.3881	-0.3922	0.0813	0.0881	-0.3877
Трудоёмкость, чел·ч	0.2598	1	0.4653	-0.2771	-0.2313	-0.2603	0.0365	0.1022	-0.2488
Затраты, руб.	0.1612	0.4653	1	-0.3061	-0,2832	-0.2638	-0.1469	-0.0516	-0.2714
Время на линии, ч	-0.4586	-0.2771	-0.3061	1	0.9155	0.8171	0.0543	-0.0133	0.8318
Пробег, км	-0.3881	-0.2313	-0.2832	0.9155	1	0.7315	0.2861	0.1067	0.7329
Количество рейсов, шт.	-0.3922	-0.2603	-0.2638	0.8171	0.7315	1	-0.3898	-0.4764	0.9785
Среднее расстоя-ние, км	0.0813	0.0365	-0.1469	0.0543	0.2861	-0.3898	1	0.8588	-0.3580
Средняя высота, м	0.0881	0.1022	-0.0516	-0.0133	0.1067	-0.4764	0.8588	1	-0.4122
Перевезено, т	-0.3877	-0.2488	-0.2714	0.8318	0.7329	-0.9785	-0.3580	-0.4122	1

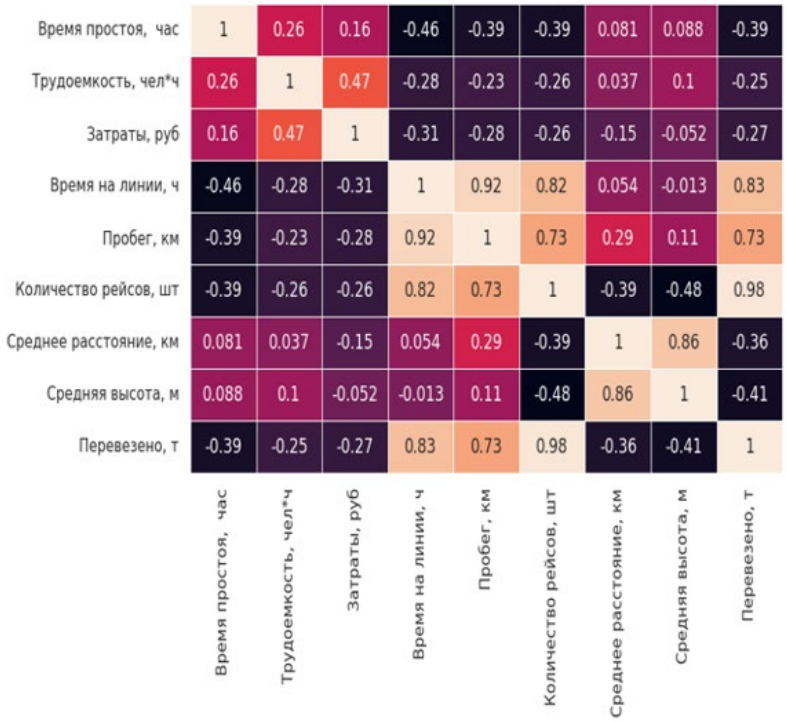


Рис. 16. Матрица коэффициентов парной корреляции Пирсона
Fig. 16. Pearson pair correlation coefficient matrix

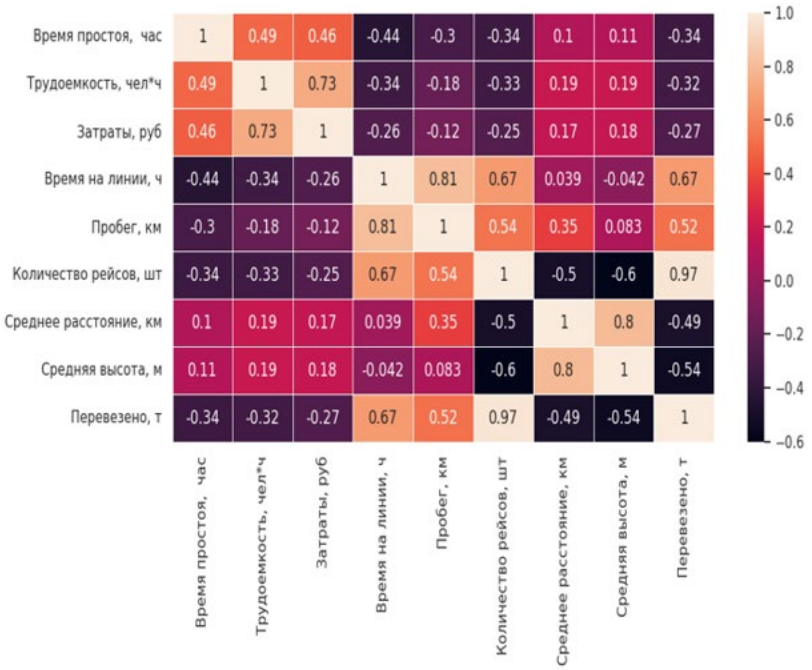


Рис. 17. Матрица коэффициентов ранговой корреляции Спирмена
Fig. 17. Spearman's rank correlation coefficient matrix

Для нас наибольший интерес представляют ежемесячные затраты. На рис. 18 представлены значения коэффициентов корреляции между величиной эксплуатационных затрат и остальными показателями. Более светлый тон соответствует бóльшим положительным значениям коэффициентов корреляции.

	Время на линии, ч	Время простоя, час	Количество рейсов, шт	Перевезено, т	Пробег, км	Среднее расстояние, км	Средняя высота, м	Трудоемкость, чел*ч
Pearson	-0.306060	0.161236	-0.263838	-0.271360	-0.283161	-0.146907	-0.051573	0.465289
Spearman	-0.263338	0.459655	-0.253944	-0.265465	-0.122375	0.172359	0.175412	0.733667

Рис. 18. Коэффициенты корреляции между показателем «Затраты» и эксплуатационными показателями
Fig. 18. Correlation coefficients between the indicator "Operating costs" and operational indicators

Анализ результатов корреляционного анализа позволяет сделать вывод о слабом влиянии большинства показателей на эксплуатационные затраты. Единственным показателем, оказывающим сильное влияние является показатель «Трудоёмкость». Это объясняется тем, что на исследуемом объекте трудоёмкие работы требуют расхода более дорогих материалов. Другим словами, эксплуатационные затраты в основном коррелируют именно с трудоёмкостью работ по устранению отказов.

5. Заключение

Выполненный анализ позволил сформулировать следующие выводы и рекомендации:

- линейная корреляционная связь между эксплуатационными затратами и большинством показателей работы автосамосвалов не выявлена;
- необходимы дополнительные исследования для установления возможной нелинейной зависимости величины эксплуатационных затрат от остальных показателей, поиска инсайтов, выявления дополнительных влияющих факторов, например, горно-геологических и природно-климатических, состояния материально-технической базы предприятия, а также возраста автосамосвалов.

Таким образом, мы пришли к выводу, что требуются дополнительные исследования с применением более совершенных методов анализа для выявления закономерностей при поддержании автомобильного транспорта в работоспособном состоянии, а также для разработки методов и стратегий ТОиР. Необходимо выбрать методы предсказательной аналитики для более точного планирования эксплуатационных показателей и затрат на ТОиР парка автосамосвалов.

Приложение А

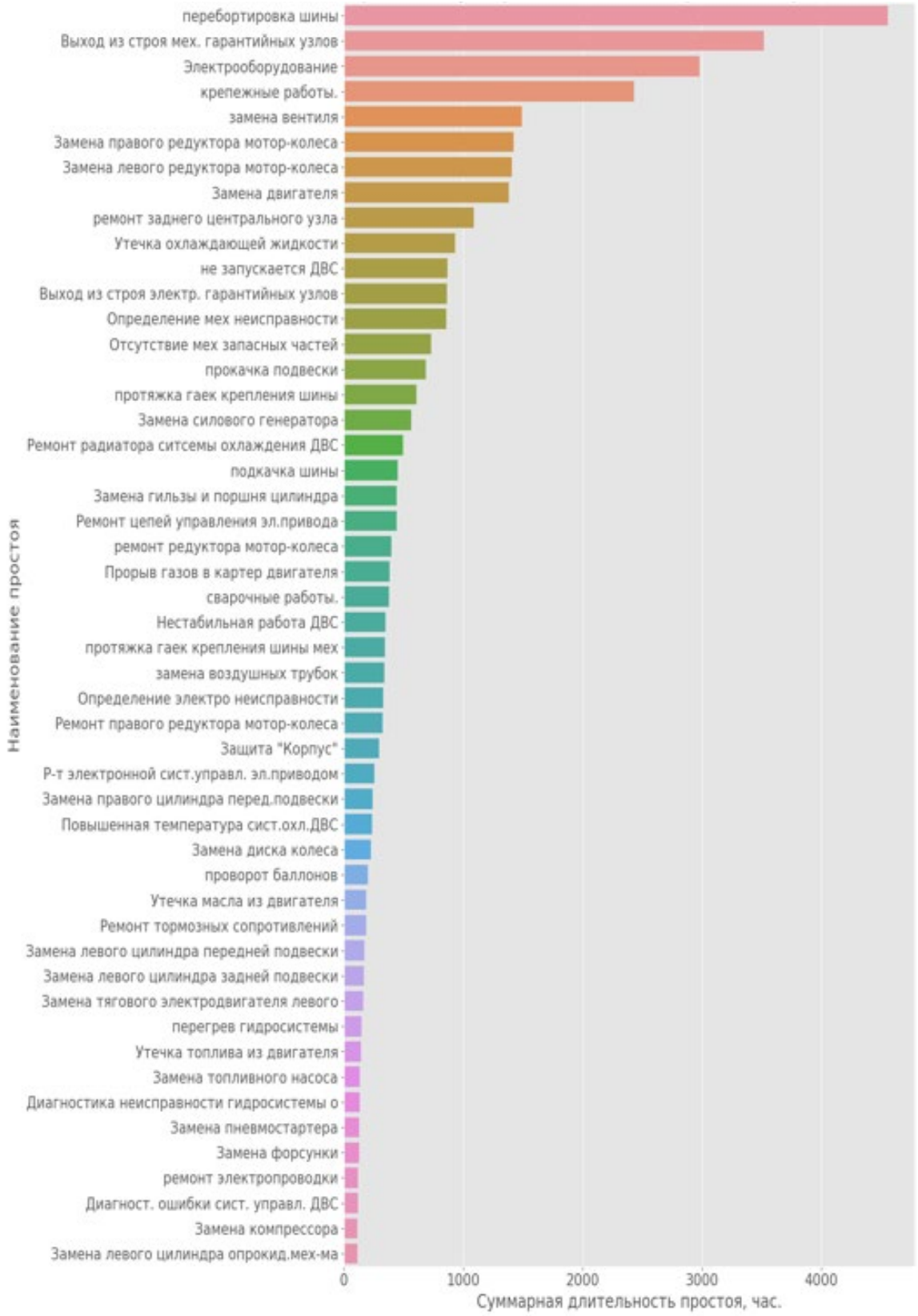


Рис. А.1. Распределение продолжительности простоев автосамосвалам по причинам простоев (2019–2022 гг.)
Fig. A.1. Distribution of dump trucks downtime by reasons (2019–2022)

Список литературы

1. Никитина О.Е., Оралов О.Т. Исследование экономико-математической модели изменения затрат на добычу известняка при углублении горных работ на примере ОАО «ЮТРУ» // Труды университета. 2002. № 1. С. 65-68.
2. Topal E., Ramazan S. Mining truck scheduling with stochastic maintenance cost // Journal of Coal Science and Engineering (China). 2012. Vol. 18. No. 3. pp. 313-319. https://www.doi.org/10.1007/s12404-012-0316-4.
3. Васильева А.В., Коста А.В. Анализ развития карьерного транспорта // Обмен знаниями как ключевое условие научного прогресса. Казань: ООО "СитИвент", 2021. С. 260–264.
4. Лель Ю.И., Стенин Ю.В., Колчанов А.Г. Карьерные автодороги - их значимость и проблемы совершенствования // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 3. С. 103–108.
5. Савин Л.О., Королёв М.В., Носов М.В. Анализ определяющих параметров и возможностей использования гибких стратегий технического обслуживания для повышения надёжности автомобильной техники при её эксплуатации в особых условиях // Научный результат. Информационные технологии. 2017. Т. 2. № 2. С. 9–20.
6. MES – Manufacturing Execution System (система управления производственными процессами) [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/MES (дата обращения: 27.07.2022).
7. Павлов А.А. Состояние рынка ERP-решений и тренды его развития, рекомендации по внедрению ERP-систем // Аллея науки. 2021. Т. 2. № 12. С. 192–210.
8. Python [Электронный ресурс]. URL: https://www.python.org (дата обращения: 08.08.2022).
9. Pandas – data analysis and manipulation tool [Электронный ресурс]. URL: https://pandas.pydata.org (дата обращения: 10.08.2022).
10. NumPy - the fundamental package for scientific computing with Python [Электронный ресурс]. URL: https://numpy.org (дата обращения: 10.08.2022).
11. Seaborn: Statistical Data Visualization [Электронный ресурс]. URL: http://seaborn.pydata.org/ (дата обращения: 08.08.2022).
12. Matplotlib: Visualization with Python [Электронный ресурс]. URL: https://matplotlib.org/ (дата обращения: 08.08.2022).
13. Федотов А.В., Скабкин Н.Г. Основы теории надёжности: конспект лекций. Омск:Изд-во ОмГТУ,2010.64 с.
14. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для среднего профессионального образования. М.: Издательство Юрайт, 2022. 479 с.

References

1. Nikitina O.E. and Oralov O.T. 2002. Study of the Economic-Mathematical Model of Changes in the Cost of Limestone Extraction with the Deepening of Mining Operations on the Example of JSC “YuTRU”. *Proceedings of the University,* No. 1, pp. 65–68. (In Russ.).
2. Topal, E. and Ramazan, S. 2012. Mining truck scheduling with stochastic maintenance cost. *J Coal Sci Eng China*, Vol. 18, No. 3, pp. 313–19.
3. Vasilyeva A.V. and Kosta A.V. 2021. Analysis of Career Transport Development, *Knowledge Sharing as a Key Condition for Scientific Progress*. Kazan, LLC “SitEvent”, pp. 260–264. (In Russ.).
4. Lel Yu.I., Stenin Yu.V. and Kolchanov A.G. 2011. Open Pit’s Roads – Significance and Problems of Improvement. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal),* No. 3, pp. 103–08. (In Russ.).
5. Savin L.O., Korolev M.V. and Nosov M.V. 2017. Analysis of Influential Parameters and the Possibilities of Using Flexible Maintenance Strategies to Improve Reliability of Automotive Vehicles during its Operation in Special Conditions. *Research Result. Information Technologies*, Vol. 2, No. 2, pp. 9–20. (In Russ.).
6. *Manufacturing execution systems (MES)*. https://en.wikipedia.org/wiki/Manufacturing_execution_system (Accessed 27 July 2022).
7. Pavlov A.A. 2021. The State of the ERP Solutions Market and its Development Trends, Recommendations for the ERP Systems Implementation. *Alley of Science*, Vol. 2, No. 12, pp. 192–210. (In Russ.).
8. *Python*. https://www.python.org (Accessed 8 August 2022).
9. *Pandas - data analysis and manipulation tool*. https://pandas.pydata.org (Accessed 10 August 2022).
10. *NumPy - the fundamental package for scientific computing with Python*. https://numpy.org (Accessed 10 August 2022).
11. *Seaborn: Statistical Data Visualization*. http://seaborn.pydata.org/ (Accessed 8 August 2022).
12. *Matplotlib: Visualization with Python*. https://matplotlib.org/ (Accessed 8 August 2022).

13. Fedotov A.V. and Skabkin N.G. 2010. *Fundamentals of the Reliability Theory . Omsk, . Lecture Notes.* Omsk, OmSTU Publishing House.
14. Gmurman V.E. 2022. *Probability Theory and Mathematical Statistics. Textbook for Secondary Vocational Education.* Moscow, Yurayt Publishing House.