

Методика прогнозирования интенсивности отказов горных машин с учетом многорежимности их эксплуатации

Р.Н. Сафиуллин¹, Л.А. Симонова², С.А. Лавренко¹, А.Э. Пеплер¹✉, М.В. Богданов¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Казанский федеральный университет, г. Набережные Челны, Российская Федерация

✉ artem_pepler@mail.ru

Резюме: В статье представлена методика прогноза эксплуатационных отказов транспортных средств, разработанная на основе методов теории вероятностей, математического и имитационного моделирования. Методика отличается от известных более точным определением момента времени наступления эксплуатационного отказа техники с учетом нарастающего значения пробега горных машин за каждую временную дискрету модельного времени в зависимости от эксплуатационных факторов, характеризующих конструктивные, эксплуатационные свойства техники и условия ее эксплуатации, для последующего их учета при построении адекватной модели восстановления технического состояния горных машин. Предложенная структурная модель прогнозов интенсивности отказов горных машин с учетом результатов обработки больших массивов данных о техническом состоянии позволит количественно оценить показатели эффективности функционирования системы восстановления горных машин предприятия. Получаемые с ее помощью результаты используются при проведении научных исследований по технико-экономическому обоснованию технических требований к перспективной системе восстановления средств предприятия горнодобывающей промышленности в ходе эксплуатации с целью создания необходимых условий обеспечения их высокой технической готовности.

Ключевые слова: горные машины, транспортные средства, прогнозирование интенсивности отказов, эксплуатационные отказы, специальное оборудование, обработка больших данных

Для цитирования: Сафиуллин Р.Н., Симонова Л.А., Лавренко С.А., Пеплер А.Э. Богданов М.В. Методика прогнозирования интенсивности отказов горных машин с учетом многорежимности их эксплуатации. *Горная промышленность*. 2026;(1):164–169. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-1-164-169>

Methodology for predicting the failure rate of mining machines with account of their multimode operation

R.N. Safiullin¹, L.A. Simonova², S.A. Lavrenko¹, A.E. Pepler¹✉, M.V. Bogdanov¹

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

² Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny, Russian Federation

✉ artem_pepler@mail.ru

Abstract: The paper presents a methodology for forecasting operational failures of vehicles that was developed based on provisions of the probability theory, as well as methods of the mathematical and simulation modelling. This methodology differs from the known ones by a more accurate determination of the moment in time when the operational failure of the vehicle takes place with account of the cumulative mileage of mining machine for each discrete period of time within the simulation model depending on the operational factors that characterise the design, operational properties and operating conditions of the vehicle for their subsequent accounting when designing an adequate model for recovery of the mining machine's technical condition. The proposed structural model to forecast the failure rate of the mining machines taking into account the results of processing big sets of data on technical condition will allow to quantitatively assess the performance indicators of the company's repair system of mining equipment. The results obtained with the help of this model are used in research activities on technical and economic justification of technical requirements for the prospective system to restore mining equipment during operation in order to create the necessary conditions for ensuring their high availability.

Keywords: mining machines, vehicles, forecasting the failure rate, operational failures, dedicated equipment, processing of big data

For citation: Safiullin R.N., Simonova L.A., Lavrenko S.A., Pepler A.E., Bogdanov M.V. Methodology for predicting the failure rate of mining machines with account of their multimode operation. *Russian Mining Industry*. 2026;(1):164–169. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-1-164-169>

Введение

Постоянный контроль технического состояния горных машин (ГМ) позволит повысить эффективность их использования и производительность горного предприятия. Проблемным вопросом остается организация обработки массивов больших данных эксплуатационных характеристик горного транспорта для прогнозирования динамики изменения технического состояния с целью предупреждения внезапных отказов. Сложной научной задачей является установление функциональной связи между параметрами горных машин и видом критерия эффективности [1; 2]. Исходя из расчетов производственной программы и данных, полученных на предприятиях горнодобывающей промышленности, расчетные значения оказываются меньше, чем фактические значения выхода машин из строя, в связи с этим можно сделать вывод, что различные дорожные условия, технические и эксплуатационные проблемы ГМ существенно сказываются на производительности [3–5]. С ростом пробега увеличивается интенсивность эксплуатационных отказов ГМ [6].

Мониторинг и анализ результатов контроля технического состояния ГМ позволяют оценить эффективность их работы, выявить проблемные области и предпринять корректирующие действия [7; 8]. Внедрение программно-аппаратных средств автоматизированных систем позволяет операторам систематически осуществлять мониторинг и обрабатывать результаты анализа «больших данных» [9].

На первых этапах разработки автоматизированных систем, как правило, чрезвычайно трудно установить функциональную связь между параметрами горных машин и видом критерия эффективности. В этом случае выбор технологии можно производить исходя из условий соответствия ее параметров требованиям технического задания или расчета статистики и динамики системы. Эти условия можно записать в виде

$$\left. \begin{aligned} K_i^c &\leq \min_j K_{ij}^M \in \{K_{i1}^M, K_{i2}^M, \dots, K_{ij}^M, \dots, K_{i3}^M\}; \\ K_l^c &\geq \min_j K_{ij}^M \in \{K_{l1}^M, K_{l2}^M, \dots, K_{lj}^M, \dots, K_{lm}^M\} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где K_{ij}^M, K_{ij}^c – i -й и l -й технические параметры ГМ; $j = 1, 2, \dots, m$ – порядковые номера ГМ, из которых производится выбор; K_{ij}^c, K_{ij}^c – значения i -го и l -го параметров, определяемых техническим заданием или расчетом; i, l – порядковые номера.

Для более полного описания имитационной стохастической модели функционирования автоматизированных систем прогнозирования технического состояния ГМ, позволяющей в режиме модельного (реального) времени производить имитацию процессов функционирования различных органов и средств в их взаимосвязи друг с другом на различных уровнях функционирования данной системы, была разработана обобщенная блок-схема, включающая все ее шаги и этапы [10; 11]. На основе методов математического и имитационного моделирования авторами разработана методика прогнозирования интенсивности эксплуатационных отказов горных машин с учетом многорежимности их эксплуатации, позволяющая в режиме модельного (реального) времени получать необходимые исходные данные для функционирования методики количественной оценки показателя эффективности и методики формирования стоимостных зависимостей указанной системы.

Результаты и их обсуждения

На этапе рассматриваемого периода жизненного цикла эксплуатации ГМ, интенсивного их применения по назначению в сложных условиях на процесс функционирования горного предприятия оказывают существенное влияние эксплуатационные факторы [12; 13]. При этом общая интенсивность эксплуатационных отказов ГМ $\lambda_{\Sigma}^{\text{ТТМ}}(t_3)$ и специального оборудования ГМ $\lambda_{\Sigma}^{(\text{с.о.})\text{сп-в АТП}}(t_3)$ за незначительный по времени жизненный цикл эксплуатационного периода применения по своему назначению $t_3 \rightarrow \min$ будет определяться как

$$\begin{aligned} \lambda_{\Sigma}^{(\text{с.о.})\text{сп-в АТП}}(t_{6,д}) &= \lambda_{\Sigma,п}^{(\text{с.о.})\text{сп-в АТП}}(t_3) + \\ &+ \left[\lambda_3^{(\text{с.о.})\text{сп-в АТП}}(t_3) \rightarrow \min \right] \approx \lambda_{\Sigma,п}^{(\text{с.о.})\text{сп-в АТП}}(t_3), \\ \lambda_{\Sigma}^{\text{ТТМ}}(t_3) &= \lambda_{\Sigma,п}^{\text{ТТМ}}(t_{6,д}) + \left[\lambda_3^{\text{ТТМ}}(t_3) \rightarrow \text{Const} \right] = \\ &= \lambda_{\Sigma,п}^{\text{ТТМ}}(t_3) + \lambda_3^{\text{ТТМ}}(t_3) \end{aligned} \quad (2)$$

где $\lambda_{\Sigma,п}^{(\text{с.о.})\text{сп-в АТП}}(t_3), \lambda_{\Sigma,п}^{\text{ТТМ}}(t_3)$ – интенсивность повреждений соответственно специального оборудования ГМ; $\lambda_3^{(\text{с.о.})\text{сп-в АТП}}(t_3), \lambda_3^{\text{ТТМ}}(t_3)$ – интенсивность эксплуатационных отказов соответственно специального оборудования средств АТП и ГМ.

Из зависимости (2) видно, что при рассмотрении незначительного по времени эксплуатационного периода применения по своему назначению ($t_3 \leq 30$ сут) эксплуатационные отказы, возникающие в процессе использования специального оборудования средств горного предприятия (ГП), смонтированного на ГМ, можно не учитывать. Однако этого нельзя сказать о ГМ. Технические средства в этот период очень интенсивно эксплуатируются в тяжелых условиях, что приводит к возникновению значительного количества эксплуатационных отказов ГМ [14; 15].

Для учета этого фактора используется методика прогноза эксплуатационных отказов ГМ. Методика прогноза эксплуатационных отказов ГМ ГП предназначена для определения вероятности возникновения данных отказов технических средств от воздействия эксплуатационных факторов.

Исходными данными представленной методики являются параметры, характеризующие конструктивные и эксплуатационные свойства ГМ ГП, а также условия их эксплуатации [16].

На основании номера образца средств ГП и условий эксплуатации ГМ определяются необходимые характеристики, представленные в табл. 1.

Структурная модель прогноза интенсивности эксплуатационных отказов ГМ представлена на рис. 1.

Представленная методика позволяет определить вероятность наступления эксплуатационного отказа ГМ в момент времени t (на определенном шаге моделирования). В отличие от ряда существующих методик прогноза эксплуатационных отказов ГМ, определяющих выход ГМ из строя в зависимости от величины суточного пробега, данная методика позволяет учитывать пробег средств АТП с нарастающим значением за каждую временную дискрету Δt модельного времени с целью более точного определения момента времени наступления эксплуатационного отказа.

Таблица 1
Исходные данные методики прогноза эксплуатационных отказов горных машин

Table 1
Input data for the methodology to forecast operational failures of mining machines

Входные параметры	Параметры базы данных	
	Наименование характеристик	Обозначение
Номер образца средств АТП (иср-в АП)	Марка ГМ АТП, б/р	$K_{ГМ}$
	Средняя наработка на отказ ГМ k -й марки, км	$L_{срk}$
	Средняя продолжительность нахождения рассматриваемой k -й марки ГМ в серийном производстве, лет	$T_{срk}$
	Коэффициент роста надежности k -й марки ГМ в процессе обработки данных на производстве, 1/год	$k_{р.нк}$
	Коэффициент снижения надежности k -й марки ГМ в процессе его использования по назначению, км/год	k'_{4k}
	Коэффициент снижения надежности k -й марки ГМ в процессе его содержания на хранении, км/год	k_{4k}
	Коэффициент учета влияния прицепной нагрузки и характера работы специального оборудования, ГМ i -го образца, б/р	$k_{3эi}$
	Продолжительность (время) использования ГМ i -го образца по назначению, лет	$T_{иi}$
	Продолжительность (время) длительного хранения ГМ i -го образца, лет	$T_{д.хi}$
	Пробег ГМ i -го образца до последнего эксплуатационного отказа (ремонта), км	$L_{п.оти}$
Пробег ГМ i -го образца на начало эксплуатации, км	$L_{н.э.дi}$	
Средняя скорость движения ГМ i -го образца, км/ч	$V_{ср.двi}$	
Условия эксплуатации ГМ	Коэффициент корректирования безотказности техники для конкретных дорожных условий, б/р	$k_{1э}$
	Коэффициент учета влияния климатических факторов, б/р	$k_{2э}$
	Коэффициент, учитывающий дорожные условия, влияющие на скорость движения, б/р	$K_{д.усл}$
Временная дискрета (интервал модельного времени), ч		Δt

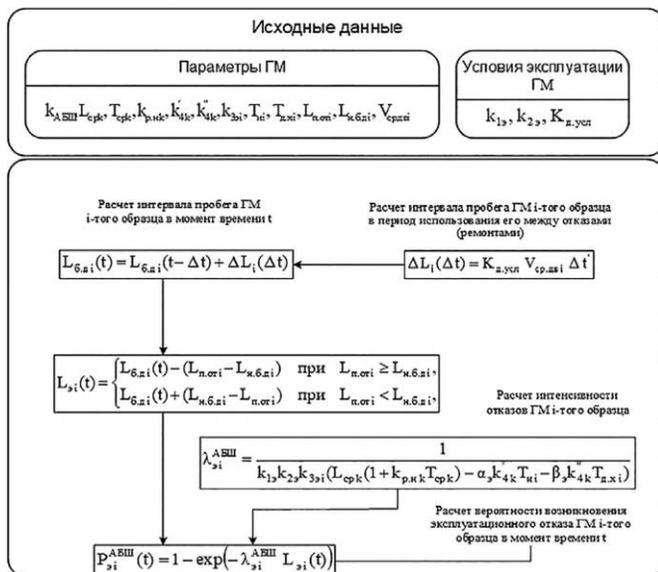


Рис. 1
Структурная модель прогноза интенсивности эксплуатационных отказов горных машин

Fig. 1
A structural model to forecast the operational failure rate of mining machines

Рамками использования методики определено, что рассматривается период нормальной эксплуатации ГМ и ресурс (наработка до очередного планового ремонта или списания) ГМ позволяет выполнить поставленные перед средствами ГП задачи.

Полагаясь на исследования, проведенные в работах [17; 18], можно рассчитать выход из строя автомобильной техники от эксплуатационных факторов. Зная среднее значение наработки на отказ $L_{ср}$ (эталонного образца), можно вычислить вероятность возникновения эксплуатационного отказа ГМ $P_3^{ГМ}$ за его пробег L_3 при характерных природно-климатических и дорожных условиях. Вероятность возникновения эксплуатационного отказа ГМ i -го образца средства горного предприятия $P_3^{ГМ}$ определяется в соответствии с выражением вида [1–3]:

$$P(t) = 1 - \exp\left(-\frac{L_3 i(t)}{k_{1э} k_{2э} k_{3эi} (L_{срk} (1 + k_{р.нк} k T_{срk}) - \alpha_3 k'_{4k} k T_{иi} - \beta_3 k''_{4k} k T_{д.хi})}\right), \quad (3)$$

где $L_{3i}(t)$ – интервал пробега средства АТП в период использования его между отказами (ремонтами); $k_{1э}$ – коэффициент корректирования безотказности техники для конкретных дорожных условий; $k_{2э}$ – коэффициент учета влияния климатических факторов; $k_{3эi}$ – коэффициент учета влияния прицепной нагрузки и характера работы специального оборудования, ГМ i -го образца; $L_{срk}$ – средняя наработка на отказ ГМ k -й марки; $k_{р.нк}$ – коэффициент роста надежности k -й марки ГМ в процессе обработки данных на производстве; $T_{срk}$ – средняя продолжительность нахождения рассматриваемой k -й марки ГМ в серийном производстве; k'_{4k} – коэффициент снижения надежности k -й марки ГМ в процессе его использования по назначению;

нию; $T_{иi}$ – продолжительность (время) использования ГМ i -го образца по назначению; k''_{4k} – коэффициент снижения надежности k -й марки ГМ в процессе его содержания на хранении; $T_{л.иi}$ – продолжительность (время) длительного хранения ГМ i -го образца; α, β – переводные коэффициенты.

В свою очередь интервал пробега ГМ i -го образца среднего АТП в период использования его между отказами (ремонтами) определяется зависимостью вида

$$L_{эi}(t) = \begin{cases} L_{б,ди}(t) - (L_{п,оти} - L_{н,б,ди}) & \text{при } L_{п,оти} \geq L_{н,б,ди}, \\ L_{б,ди}(t) + (L_{н,б,ди} - L_{п,оти}) & \text{при } L_{п,оти} < L_{н,б,ди}, \end{cases} \quad (4)$$

где $L_{б,ли}(t)$ – интервал пробега ГМ i -го образца в ходе эксплуатации;

$L_{п,оти}$ – пробег ГМ i -го образца до последнего эксплуатационного отказа (ремонта); $L_{н,б,ли}$ – пробег ГМ i -го образца на начало эксплуатации.

Интервал пробега ГМ i -го образца в ходе эксплуатации $L_{б,ли}(t)$ в момент времени t (на текущем шаге моделирования) определяется согласно зависимости

$$L_{б,ди}(t) = L_{б,ди}(t - \Delta t) + \Delta L_i(\Delta t), \quad (5)$$

где $L_{б,ли}(t - \Delta t)$ – интервал пробега ГМ i -го образца в ходе интенсивной эксплуатации на предыдущем шаге модельного времени; $\Delta L_i(\Delta t)$ – интервал пробега ГМ i -го образца за временную дискрету Δt (один шаг модельного времени).

В начале моделирования при $t = 0$ интервал пробега ГМ i -го образца в ходе эксплуатации $L_{б,ли}(t)$ равен 0. На первом шаге моделирования интервал пробега ГМ на предыдущем шаге моделирования $L_{б,ли}(t - \Delta t)$ принимает значение 0, а $L_{б,ли}(t) = \Delta L_i(\Delta t)$. На последующих шагах моделирования интервал пробега ГМ i -го образца в ходе эксплуатации $L_{б,ли}(t)$ определяется по зависимости (5).

Интервал пробега ГМ i -го образца (в случае его движения) за временную дискрету $\Delta t'$ определяется по формуле

$$\Delta L_i(\Delta t) = K_{д,усл} V_{ср,двi} \Delta t', \quad (6)$$

где $K_{д,усл}$ – коэффициент, учитывающий дорожные условия, влияющие на скорость движения ГМ; $V_{ср,двi}$ – средняя скорость движения ГМ i -го образца.

Заключение

Таким образом, для реализации методики определяется вероятность выхода из строя ГМ i -го образца от эксплуатационных факторов $P_{эi}^{АБШ}(t)$ в момент времени t (на текущем шаге моделирования) с помощью аналитических зависимостей (3)–(6) на интервале пробега $L_{б,ли}(t)$, изменяющегося на определенном шаге моделирования (остальные показатели в выражениях (3)–(6) являются заданными) [19; 20]. Затем в алгоритме моделируется случайное равномерно распределенное в диапазоне [0; 1] число. В случае если данное число меньше рассчитанной вероятности, то образец ГМ считается неработоспособным. При этом вероятность возникновения эксплуатационного отказа ГМ $P_{эki}^{АБШ} = 1$ [21–23].

Предложенная структурная модель прогнозов интенсивности отказов ГМ с учетом результатов обработки больших массивов данных о техническом состоянии позволит количественно оценить показатели эффективности функционирования системы восстановления ГМ предприятия, а получаемые с ее помощью результаты используются при проведении научных исследований по технико-экономическому обоснованию технических требований к перспективной системе восстановления средств предприятия горнодобывающей промышленности в ходе эксплуатации с целью создания необходимых условий обеспечения их высокой технической готовности.

Вклад авторов

Р.Н. Сафиуллин – генерация идеи исследования, постановка задачи и плана исследования, интерпретация результатов исследования, написание текста статьи.

Л.А. Симонова – генерация идеи исследования, аналитический обзор, написание текста статьи.

С.А. Лавренко – генерация идеи исследования, аналитический обзор, написание текста статьи.

А.Э. Пеплер – аналитический обзор, написание текста статьи.

М.В. Богданов – аналитический обзор.

Author's Contribution

R.N. Safiullin – generation of the research idea, formulation of the research problem and plan, interpretation of the research results, and writing the text of the article.

L.A. Simonova – generation of the research idea, writing the text of the article.

S.A. Lavrenko – generation of the research idea, analytical review, writing the text of the article.

A.E. Pepler – analytical review, writing the text of the article.

M.V. Bogdanov – analytical review.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no relevant conflict of interests.

Список литературы / References

1. Борисов С.В., Колтунова Е.А., Кладиев С.Н. Совершенствование структуры имитационной модели тягового асинхронного электропривода рудничного электровоза. *Записки Горного института*. 2021;247:114–121. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.12>
Borisov S.V., Koltunova E.A., Kladiev S.N. Traction asynchronous electric drive of mine electric locomotivesimulation model structure improvement. *Journal of Mining Institute*. 2021;247:114–121. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.12>
2. Simonova L.A., Dem'yanov D.N., Kapitonov A.A. Smart information system for generating design constraints in the auto industry. *Russian Engineering Research*. 2020;40(12):1034–1038. <https://doi.org/10.3103/S1068798X20120199>
3. Шибанов Д.А., Иванов С.Л., Емельянов А.А., Пумпур Е.В. Оценка показателей работоспособности карьерных экскаваторов в реальных условиях эксплуатации. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(10):86–94. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-10-0-86-94>
Shibanov D.A., Ivanov S.L., Yemelyanov A.A., Pumpur E.V. Evaluation of working efficiency of open pit shovels in real operating conditions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(10):86–94. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-10-0-86-94>
4. Назарычев А.Н., Дяченко Г.В., Сычев Ю.А. Исследование надежности тягового электропривода карьерных самосвалов на основе анализа отказов его функциональных узлов. *Записки Горного института*. 2023;261:363–373. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16189> (дата обращения: 27.12.2024).
Nazarychev A.N., Dyachenok G.V., Sychev Y.A. A reliability study of the traction drive system in haul trucks based on failure analysis of their functional parts. *Journal of Mining Institute*. 2023;261:363–373. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16189> (accessed: 27.12.2024).
5. Беликова Д.Д., Морозов Е.В., Хисамутдинова Э.Л. Оптимальное управление силовыми агрегатами горных машин в диапазоне эксплуатационных режимов при применении системы контроля качества моторного масла. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(6):95–103. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_6_0_95
Belikova D.D., Morozov E.V., Khisamutdinova E.L. Optimizing control of mining machine power-units within the normal power setting range by means of engine oil quality monitoring. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(6):95–103. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_6_0_95
6. Курганов В.М., Грязнов М.В., Колобанов С.В. Оценка надежности функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов в карьере. *Записки Горного института*. 2020;241:10–21. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.10>
Kurganov V.M., Gryaznov M.V., Kolobanov S.V. Assessment of operational reliability of quarry excavator-dump truck complexes. *Journal of Mining Institute*. 2020;241:10–21. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.10>
7. Safiullin R., Pyrkin O., Marusin A., Safiullin R., Boryaev A., Ruchkina I. Method for the level optimization of vehicle parameters when using fuels of different quality in cold climates. *Transportation Research Procedia*. 2021;57:581–590. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.087>
8. Barjoe S.S., Rodionov V.A. Respirable dust in ceramic industries (Iran) and its health risk assessment using deterministic and probabilistic approaches. *Pollution*. 2024;10(4):1206–1226. <https://doi.org/10.22059/poll.2024.376043.2360>
9. Kukharova T., Maltsev P., Novozhilov I. Development of a control system for pressure distribution during gas production in a structurally complex field. *Applied System Innovation*. 2025;8(2):51. <https://doi.org/10.3390/asi8020051>
10. Lomazov V., Lomazov A., Petrosov D., Akupiyani O. Intelligent evaluation of implementation road infrastructure development program. *Transportation Research Procedia*. 2022;63:1089–1094. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.111>
11. Menukhova T.A., Borodina Y.V. Intelligent system for centralized freight traffic planning. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018;194(7):072008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/194/7/072008>
12. Nazarychev A., Iliev I., Manukian D., Beloiev H., Suslov K., Beloiev I. Review of operating conditions, diagnostic methods, and technical condition assessment to improve reliability and develop a maintenance strategy for electrical equipment. *Energies*. 2025;18(21):5832. <https://doi.org/10.3390/en18215832>
13. Melnikova O., Nazarychev A., Suslov K. Enhancement of the technique for calculation and assessment of the condition of major insulation of power transformers. *Energies*. 2022;15(4):1572. <https://doi.org/10.3390/en15041572>
14. Barjoe S.S., Rodionov V., Vaziri Sereshk A.M. Noise climate assessment in ceramic industries (Iran) using acoustic indices and its control solutions. *Advances in Environmental Technology*. 2025;11(1):91–115. <https://doi.org/10.22104/aet.2024.6922.1899>
15. Efimov I., Gabdulkhakov R.R., Rudko V.A. Fine-tuned convolutional neural network as a tool for automatic microstructure analysis of petroleum and pitch cokes. *Fuel*. 2024;376:132725 <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132725>
16. Safiullin R.N., Reznichenko V.V., Gorlatov D.V. Modeling and optimization of processes of transportation of heavy cargoes based on the automation of monitoring systems for the motor vehicles movement. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;378:012069. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/378/1/012069>
17. Петраков Д.Г., Пеньков Г.М., Золотухин А.Б. Экспериментальное исследование влияния горного давления на проницаемость песчаника. *Записки Горного института*. 2022;254:244–251. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.24>
Petrakov D.G., Penkov G.M., Zolotukhin A.B. Experimental study on the effect of rock pressure on sandstone permeability. *Journal of Mining Institute*. 2022;254:244–251. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.24>

18. Сафиуллин Р.Р., Симонова Л.А. Научные основы повышения эффективности внедрения интегрированных интеллектуальных технологий в транспортно-технологический процесс доставки грузов. *Горная промышленность*. 2025;(1S):55–61. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1S-55-61>
Safiullin R.R., Simonova L.A. Scientific foundations for enhancing the efficiency of implementing integrated intelligent technologies in the transport and logistics process of freight delivery. *Russian Mining Industry*. 2025;(1S):55–61. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1S-55-61>
19. Tsupkina M.V., Kirkov A.E., Klebanov D.A., Radchenko D.N. Justification of the approaches to improve management strategy of the mining system based on the analysis of data on the mining of complex structural rock blocks. *Journal of Mining Institute*. 2024;266:316–325. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16302> (accessed: 27.12.2024).
20. Safiullin R.N., Reznichenko V.V., Safiullin R.R. The software adaptive system for managing the heavy cargo transportation process based on the automated vehicle weight and size control system. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1753:012063. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1753/1/012063>
21. Сафиуллин Р.Н., Сафиуллин Р.Р., Ефремова В.А. Метод комплексной оценки бортовых информационно-управляющих систем на горных машинах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9-1):49–63. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_49
Safiullin R.N., Safiullin R.R., Efremova V.A. Method of complex assessment of on-board information and control systems on mining machines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9-1):49–63. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_49
22. Galevskiy S.G., Qian H. Developing and validating comprehensive indicators to evaluate the economic efficiency of hydrogen energy investments. *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*. 2024;7(3):188–207. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15093154>
23. Ren Y., Glazunov V.V., Efimova N.N., Shevnin V.A. Specific features of electrical resistivity tomography in coastal areas of sea waters. *Marine Geophysical Research*. 2025;46(3):19. <https://doi.org/10.1007/s11001-025-09581-8>

Информация об авторах

Сафиуллин Равил Нуруллович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры транспортно-технологических процессов и машин, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-8765-6461>; e-mail: safravi@mail.ru

Симонова Лариса Анатольевна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизации и управления, Набережночелнинский (институт) филиал Казанского федерального университета, г. Набережные Челны, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-3653-1845>; e-mail: lasimonova@mail.ru

Лавренко Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой практических навыков и опыта, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-1760-310X>, e-mail: Lavrenko_SA@pers.spmi.ru

Пеплер Артём Эдуардович – аспирант кафедры транспортно-технологических процессов и машин, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0005-5984-3154>; e-mail: artem_pepler@mail.ru

Богданов Михаил Валентинович – кандидат педагогических наук, доцент кафедры транспортно-технологических процессов и машин, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-6068-7244>; e-mail: Bogdanov_MV@pers.spmi.ru

Information about the authors

Ravil N. Safiullin – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Transport and Technological Processes and Machines, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-8765-6461>; e-mail: safravi@mail.ru

Larisa A. Simonova – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Automation and Control, Naberezhnye Chelny Institute, Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-3653-1845>; e-mail: lasimonova@mail.ru

Sergey A. Lavrenko – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Practical Skills and Experience, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0009-83963454>, e-mail: Lavrenko_SA@pers.spmi.ru

Artem E. Pepler – Postgraduate Student of the Department of Transport and Technological Processes and Machines, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0005-5984-3154>; e-mail: artem_pepler@mail.ru

Mikhail V. Bogdanov – Cand. Sci. (Educ.), Associate Professor of the Department of Transport and Technological Processes and Machines, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-6068-7244>; e-mail: Bogdanov_MV@pers.spmi.ru

Article info

Received: 27.08.2025

Revised: 20.11.2025

Accepted: 21.11.2025

Информация о статье

Поступила в редакцию: 27.08.2025

Поступила после рецензирования: 20.11.2025

Принята к публикации: 21.11.2025