Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-107-113

Экспресс-диагностика трансмиссионных систем карьерных экскаваторов

А.Э. Салимов ✉, **С.Л. Иванов, Д.А. Шибанов**
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ salimoff.abbas@gmail.com

Резюме: В условиях интенсификации горных работ карьерные экскаваторы ЭКГ-20К Узбекистана и России демонстрируют высокий уровень внеплановых простоев приводов напора и подъема, суммарно составляющих 36–44% общего времени состояния неработоспособности оборудования. Традиционные способы предупредительного технического обслуживания и обслуживания по фактическому состоянию не обеспечивают требуемого уровня готовности. В исследовании предложена система добросовестного технического обслуживания и ремонта карьерных экскаваторов на основе анализа чистоты масла, которая интегрирует адаптированный метод Fine-Kinney с полевой экспресс-диагностикой масла и алгоритмом комплексной оценки технического состояния. Алгоритм оценки автоматизирует коды дефектов и индекс технического состояния. Ключевым признаком технического состояния является соотношение в масле железа, цинка и фосфора, позволяющее прогнозировать отказы с высокой степенью вероятности. Разработанная система включает пятиэтапную процедуру анализа, унифицированную кодировку дефектов и матрицу оценки рисков по ГОСТ. Внедрение предложенной авторами системы добросовестного технического обслуживания и ремонта обеспечивает повышение готовности парка до 0,9 и снижение внеплановых простоев на 20–30% без увеличения затрат, а также повышение срока службы редукторов подъема и напора на 19,7%.

Ключевые слова: карьерный экскаватор, экспресс-диагностика, чистота масла, CM&R, риск отказа, редуктор напора, редуктор подъема, Fine-Kinney, механические примеси, техническое обслуживание, индекс технического состояния

Для цитирования: Салимов А.Э., Иванов С.Л., Шибанов Д.А. Экспресс-диагностика трансмиссионных систем карьерных экскаваторов. *Горная промышленность*. 2026;(5):107–113. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-107-113

Express diagnostics of power transmission systems of mine excavators

A.E. Salimov ✉, **S.L. Ivanov, D.A. Shibanov**
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation
✉ salimoff.abbas@gmail.com

Abstract: In conditions of intensified mining operations, the EKG-20K open-pit excavators in Uzbekistan and Russia demonstrate high levels of unscheduled downtime for their pressure and lift drives, accounting for 36–44% of the total equipment downtime. Traditional preventive and predictive maintenance methods fail to provide the required level of availability. This paper proposes a Conscientious Maintenance and Repair concept that integrates an adapted Fine-Kinney method with express field diagnostics of oil and an algorithm for a comprehensive assessment of the technical condition. The integrated algorithm automates the Diagnostic Trouble Codes (DTC) and the Equipment Health Index (EHI). A key indicator of the technical condition is the content of iron, zinc, and phosphorus in the oil, which enables prediction of failures with a high degree of probability. The system includes a five-stage analysis procedure, a unified DTC system, and a risk assessment matrix in accordance with GOST. Implementation of the Conscientious Maintenance and Repair System ensures an increase in the fleet availability up to 0.9 and a reduction in unscheduled downtime by 20–30% without increasing costs, as well as a 19.7% increase in the service life of the lift and thrust gearboxes

Keywords: mining excavator, express diagnostics, oil cleanliness, CM&R, risk of failure, thrust gearbox, lift gearbox, Fine-Kinney, mechanical impurities, maintenance and repair, Equipment Health Index

For citation: Salimov A.E., Ivanov S.L., Shibanov D.A. Express diagnostics of power transmission systems of mine excavators. *Russian Mining Industry*. 2026;(5):107–113. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-107-113

Введение

Карьерный экскаватор ЭКГ-20К грузоподъемностью 20 м³ является основным средством в технологии горнорудных предприятий Узбекистана и России. Механизмы напора и подъема обеспечивают цикл работы экскаватора «копание-транспортировка-разгрузка-возвращение в исходное положение», где любой отказ создает каскадные последствия: простои транспорта, потенциальные потери объемов эксплуатации, дополнительные материальные и ресурсные потери на внеплановое восстановление отказавшего объекта [1–3].

Статистический анализ работы эксплуатации экскаваторов ЭКГ-20К (20 ед.) за 2025 г. в условиях медных карьеров выявил следующую структуру внеплановых простоев в ремонтах:

– привод напора – 15,2% общего времени недоступности (средняя длительность отказа 16,4 ч);
– привод подъема – 23,8% (средняя длительность 14,8 ч);
– рабочий орган – 19,6%;
– ходовая часть – 12,4%;
– механизм поворота – 9,6%;
– электрооборудование – 8,2%;
– прочее – 11,2%.

Приводы напора и подъема формируют суммарно 36–44% критических отказов, определяющих эффективность работы экскаватора как горнопромышленной системы [1; 4; 5].

Традиционные подходы поддержания в готовности сложных технических объектов, к которым относят карьерные экскаваторы, не позволяют обеспечивать безаварийную работу этих машин. Так, предупредительная стратегия, реализуемая в рамках систем планово-предупредительных ремонтов (Time-Based Maintenance, TBM) с фиксированными интервалами 500/1500/3000/6000 моточасов, не учитывает разнообразие условий функционирования отдельных машин, а также реальные условия эксплуатации центрально-азиатских карьеров, в частности, запыленность атмосферы, которая имеет концентрацию 120–150 мг/м³ кварцевой пыли, и уже через 200 ч работы в масле может содержаться 15–28 мг/кг (ppm) кремния, усугубляя состояние редуктора высокой температурой масла (+65 – +78 °C) при средней температуре окружающей среды +42 °C, сопровождающееся ускоренным окислением и деградацией присадок в 2,1 раза в сравнении с нормальными условиями эксплуатации [2; 6; 7].

Обслуживание по фактическому состоянию (Condition-Based Maintenance, CBM) практически не ориентировано на проведение полевых методов экспресс-диагностики трансмиссии. В то же время лабораторный анализ масла занимает 2–4 дня, что затягивает принятие решений, особенно в случаях предотказного состояния подшипников или зубчатых передач, и может превышать цикл развития отказа, который в этом случае составляет 3–10 дней при усталостном выкрашивании или интенсивном абразивном изнашивании [8–10].

Целью настоящей работы является разработка оперативной диагностики редукторов ЭКГ-20К на основе полевого экспресс-анализа масла, интегрированной с методом оценки рисков Fine-Kinney и алгоритмом комплексной оценки технического состояния. Новизна подхода состоит в адаптации классического метода Fine-Kinney под специфику редукторов карьерных экскаваторов, разработке унифицированной системы кодирования дефектов и связи этой кодировки с единой метрикой готовности (Its – Index of Technical State) в рамках концепции добросовестного технического обслуживания и ремонта (CM&R – Conscientious Maintenance and Repair) [11; 12].

Материалы и методы

Основная гипотеза исследования: риск потенциальной опасности дефекта трансмиссии количественно оценивается как произведение трех безразмерных показателей:

$$R = P_V P_S P_{PS},$$

где P_V – вероятность отказа (0,1–10 баллов); P_S – остаточный ресурс элемента (0,5–10 баллов); P_{PS} – тяжесть последствий (1–100 баллов).

Параметры унифицированы по трем государственным стандартам:

1. ГОСТ Р 58771–2019 Менеджмент риска. Технологии оценки рисков.

2. ГОСТ Р 27.606–2013 Надежность в технике. Техническое обслуживание, ориентированное на безотказность.

3. ГОСТ 27.310–95 Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов [1; 12].

Интерпретация индекса рисков *R* представлена в табл. 1.

Таблица 1
Ранжирование рисков

Table 1
Risk ranking

Интервал *R*	Категория риска	Требуемые действия
$R < 50$	Допустимый	Продолжение текущего режима работы
$50 \le R < 150$	Низкий	Рекомендуется планово-предупредительное ТО
$150 \le R < 300$	Средний	Требуется внеплановое техническое обслуживание
$300 \le R < 600$	Высокий	Необходимо немедленное проведение корректирующего ТО
$R \ge 600$	Недопустимый	Требуется немедленный ремонт или замена элемента

Во время работы редукторов подъема и напора экскаватора возможен долив масла, продукты изнашивания удаляются фильтрами, при этом концентрация продуктов износа определяется начальной и текущей концентрацией этих продуктов в смазочном масле, емкостью картера или масляного бака системы смазывания, интенсивностью поступления продуктов износа и временем функционирования контролируемых объектов после долива масла [13–15].

В качестве ключевого диагностического признака на основании спектрометрического анализа проб масла из ванн редукторов выявлены критичные соотношения элементов (рис. 1):

– железо Fe: 70–320 мг/кг (норма < 20 мг/кг) – интенсивное изнашивание зубчатых передач, подшипников, связанное с абразивным или усталостным выкрашиванием;

– цинк Zn: 5–30 мг/кг (норма 20–40 мг/кг) – свидетельствует о деградации противозадирных присадок ZDDP;

– фосфор P: 5–20 мг/кг (норма 10–25 мг/кг) – обусловлено истощением противозадирного пакета.

Корреляционный анализ ($r = 0,87$, $p < 0,01$) подтвердил за-

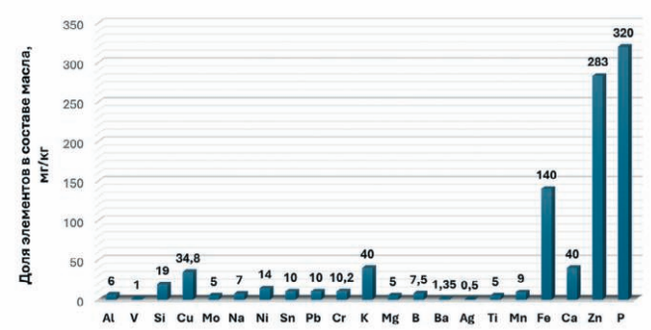


Рис. 1
Усредненный состав масла редуктора экскаватора ЭКГ-20К

Fig. 1
Averaged gear oil composition for the EKG-20K excavator

висимость: рост Fe >70 ppm предсказывает переход в предельное состояние, а интенсивность роста определяет период этого перехода – отказ с вероятностью 89% [9; 16; 17].

Результаты

1. Матричная оценка рисков Fine-Kinney позволяет преобразовать качественные экспертные оценки в числовые баллы по трехмерной матрице (табл. 2–4).

Таблица 2
Шкала P_V
(вероятность отказа)

Table 2
The P_V scale
(failure probability)

Балл	Частота	Пример для ЭКГ-20К
0,1	< 1 раз/10 лет	Сверхредкий отказ муфты
1	1 раз/год	Поломка вала
3	1 раз/квартал	Отказ подшипников
6	1 раз/месяц	Абразивный износ зубчатых колес (Fe > 70 мг/кг)
10	>1 раз/неделя	Протечка сальников

Таблица 3
Шкала P_S
(остаточный ресурс)

Table 3
The P_S scale
(remaining life time)

Балл	Остаточный ресурс%	Диагностический признак
0,5	> 90%	Новый редуктор
1	60–90%	Вибрация < 2,8 мм/с
3	30–60%	Fe 70–160 мг/кг
6,5	10–30%	Fe 160–320 мг/кг
10	< 10%	Fe > 320 мг/кг

Таблица 4
Шкала P_{PS}
(последствия)

Table 4
The P_{PS} scale
(consequences)

Балл	Длительность простоя	Производственные потери*
1	< 1 ч	300–450 м³
6	4–8 ч	1200–2400 м³
15	24 ч	4800–9000 м³
40	3–7 дней	30 000–55 000 м³
100	> 1 недели	Остановка карьера или производственной линии

*определяется для каждого горного предприятия согласно производственному плану.

Расчетный пример для редуктора напора:
– P_V = 6 (6 отказов/год по статистике 2025 г.);
– P_S = 1 (ультразвук 2,4 мм/с, 68% ресурса);
– P_S = 40 (остановка 4 смены, 18 тыс. м³ горной массы);
– R = 6 × 1 × 40 = 240 баллов («Высокий риск». Необходимо немедленное проведение корректирующего ТО) [1].

Одним из значимых проявлений наличия интенсивных деградационных процессов, как это указывалось выше, является анализ масла в ванне редуктора. Регулярный мониторинг состава масла позволяет отслеживать динамику износа и прогнозировать возможные неисправности до их критического развития. Таким образом, помимо общего анализа рисков, для редукторов подъема и напора экскаватора целесообразно регулярно проводить анализ состояния масла в ванне редуктора [18; 19].

2. Пятиэтапная процедура экспресс-анализа масла

Этап 1. Подготовка:
– пробоотборник (заявка на патент №2025120506/04 (048315)), фильтр БЧС-40;
– точка отбора: картер редуктора через осмотровый люк (T = 42–65 °C).

Этап 2. Визуальная оценка представляет собой предварительную органолептическую оценку состояния масла по прозрачности в пробе и экспресс-оценку рабочих свойств работающих масел в полевых условиях методом «масляного пятна» на фильтре, фиксации его на фото с последующим сравнением базовой шкалы классов чистоты (0–17) масла ТАП-15 редукторов напора и подъема. В зависимости от степени деградации масел присваивается код загрязнения от 1 до10.

Этап 3. Получение несгораемой фракции: фильтр с пробой сжигают пропановой горелкой на керамической пластине с последующим взвешиванием золы, если относительная масса золы > 0,05 г/мл, то присваивается код 8–10.

Этап 4. Спектрометрический анализ золы пробы или пробы масла портативным рентгенофлуоресцентным анализатором[1]. Диапазон измерений: Fe, Zn, P, Cu, Al, Si (1–500 ppm), погрешность: ±0,2 ppm, время экспозиции: 120 с (табл. 5).

Таблица 5
Нормативы загрязнителей
(шкала ppm)

Table 5
Standard limits for contaminants (ppm scale)

Элемент	Норма, ppm	Код 4	Код 6	Код 8	Код 10
Fe	< 20	20–70	70–160	160–320	> 320
Zn	20–40	15–20	10–15	5–10	< 5
P	10–25	8–10	5–8	3–5	< 3
Si	< 5	5–15	15–30	> 30	–

Этап 5. Кодировка дефекта.
Формат: Z-XX1-XX2-X3-XX4, где
– Z – привод: 01 – напора, 02 – подъема;
– XX1 – тип проявления дефекта: 1 – масло, 2 – вибрация, 3 – T (температура);
– XX2 – степень отклонения от нормы: код 0–10 (визуальная оценка по базовой шкале загрязнений и/или масса взвешенной золы, и/или шкала ppm);
– X3 – механизм деградации: 1 – изнашивание, наличие абразива, 2 – усталостное выкрашивание, 3 – деградация присадки, старение масла;

1 Рентгенофлуоресцентный анализатор. Detector System. Режим доступа: https://detsys.ru/catalog/obnaruzhiteli-vzryvchatyh-veshhestv/portativnyy_rentgenofluorestsentnyy_analizator_metekspert/ (дата обращения 04.02.2026).

– XX4 – рекомендуемый перечень мероприятий по недопущению отказа: 0 – не требует внеплановых и плановых действий, 4 – ТО, 6 – ТР (требуется внеплановый ремонт), 8 – КР, 10 – замена (списание) [1; 20; 21].

Пример: по результатам очередного контроля анализа масла в ванне редуктора подъема [22] капельная проба показала процент загрязнения по массе, равный 0,004–0,008, что соответствует среднему показателю загрязнения – требуется очистка или замена масла, Код – 8. Взвешивание золы пробы и соответствующий пересчет показал массу 0,049 г/мг. Масло соответствует 14-му классу чистоты, Код – 6 (требует плановой замены). Спектральный экспресс- анализ золы пробы выявил Fe = 185 ppm, Zn = 12 ppm, что соответствует достаточно загрязненному маслу продуктами изнашивания в виде железа, говорящему об интенсивном изнашивании зубчатых колес и/или усталостном выкрашивании подшипников, Код – 8. Значительное снижение действенности противозадирных присадок по Zn – Код 6. Тогда кодировка дефекта по маслу, для нейтрализации риска более высокого ранга, будет выглядеть так: **02-100-06-1-8.**

3. Детерминированный алгоритм представляет собой специализированный метод комплексной оценки технического состояния оборудования (Index of Technical State, Its или индекс технического состояния, ИТС). Это количественная оценка текущего технического состояния объекта, количественно определяющая его работоспособность в рамках установленных технических требований. Индекс используют для планирования технического обслуживания, ремонтов и замены оборудования, а также для оценки рисков его эксплуатации [23; 24]. В нашем случае оценку технического состояния редукторов подъема и напора экскаватора возможно получить, объединив описанные выше оценки рисков, результаты пятиэтапной процедуры экспресс-анализа масла с результатами контроля вибрации и температуры редуктора или его частей [25–27].

Формула для комплексной оценки редукторов напора и подъема при оценке их состояния по маслу имеет вид:

$$Its = \Sigma\ (Kd\ Vm\ Rf),$$

где *Kd* – код дефекта (2–10); *Vm* – весомость последствий отказа редуктора в целом (0,45) и его элементов: зубчатая передача (0,25), муфта (0,2), вал (0,1); *Rf* – коэффициент риска факторов: пыль (1,2), температура (1,1), эргатика (1,3).

Пусть при работе редуктора была зафиксирована повышенная вибрация, проявляющаяся на одной из зубцовых частот, а повышенная температура зафиксирована в районе муфты.

Назначим пороговые значения готовности *Its*:

– < 400 – зеленая зона (> 95% ресурса);

– 400–1000 – желтая зона (75–95%);

– > 1000 – красная зона (< 75%).

На основании принятых исходных данных индекса технического состояния редуктора по трем указанным параметрам получим:

– масло: *Kd* = 6, *Vm* = 0,45, *Rf* = 1,2; $Its_М$ = 6·0,45·1,2 = 3,24;

– вибрация: *Kd* = 4, *Vm* = 0,25, *Rf* = 1,0; $Its_В$ = 4·0,25·1,0 = 1,0;

– температура: *Kd* = 2, *Vm* = 0,20, *Rf* = 1,1; $Its_Т$ = 2·0,2·1,1 = 0,44.

Its = 4,68 (желтая зона, редуктор требует внепланового ремонта (ТР)), код **02-123-06-3-6**.

Для более глубокого и всестороннего анализа оценки состояния редукторов количество контролируемых параметров может быть увеличено, однако следует помнить, что их количество должно быть минимальным и достаточным для решения поставленной задачи. Представляется правильным в рассматриваемом случае ограничиться этими тремя параметрами, учитывая тот факт, что по J. Moubray [28] на ранней стадии проявляются изменения уровня вибрации за 1–9 мес до отказа, появление железа в масле удается обнаружить за 1–6 мес до отказа, а изменение температурного поля фиксируется за 3–12 недель до отказа. Таким образом, имеется и время, и возможность предусмотреть мероприятия технического обслуживания и ремонта для восстановления ресурса объекта.

Обсуждение результатов

Внедрение в практику плановых осмотровых мероприятий экспресс-диагностики масла заметно расширяет информационный фон при оценке состояния редукторов экскаватора, частота таких диагностических процедур, очевидно, способствует более глубокому пониманию происходящих нелинейных деградационных процессов собственно в редукторе и позволяет оперативно принимать своевременные решения по предупреждению отказов. Оперативность реализации восстановительных мероприятий и мероприятий организационного характера благодаря применению кодировки в формате ZXX1-XX2-X3-XX4 и алгоритмизации процедур по оценке индекса технического состояния (алгоритм Its) позволяет оперативно и с минимальными материальными и временными потерями планировать и осуществлять поддержание инспектируемых объектов на заданном уровне работоспособности. Блокчейн неизменяемой истории кодов обеспечивает прозрачность и объективность оценочных суждений о состоянии объекта. Все это выгодно отличает подходы системы технического обслуживания и ремонта от алгоритмов традиционных систем.

В перспективе применение **IoT**-датчиков Fe/Zn позволят онлайн каждые 4 ч с точностью ±2 ppm проводить мониторинг состояния как элементов редуктора, так и состояния масла в его ванне в автоматическом режиме без участия человека в диагностических процедурах непосредственно на машине. А цифровые двойники: CFD-модели масляного потока редукторов позволят заблаговременно оценивать эффективность и своевременность планируемых ремонтно-восстановительных и профилактических мероприятий в режиме симуляции.

Заключение

Предложенный способ экспресс-диагностики трансмиссионных систем карьерных экскаваторов ЭКГ-20К на основе анализа чистоты масла открывает путь к настоящему переходу от предупредительного обслуживания к обслуживанию по техническому состоянию основных механизмов экскаватора, что стройно вписывается в надежностно-центрированную систему RCM (Reliability-Centered Maintenance) или техническое обслуживание, ориентированное на безотказность (ГОСТ Р 27.606–2013). Интеграция в CM&R с расчетом риска по методу Fine-Kinney и кодировкой дефектов позволяет оперативно выявлять критические тенденции – от абразивного загрязнения до деградации присадок – и принимать обоснованные решения по плановому восстановлению ресурса редукторов напора и подъема, снижая тем самым риски аварийных отказов ресурсоопределяющих элементов экскаватора.

Реализация предложенного способа способствует повышению готовности рассматриваемого оборудования

до 0,9, снижая внеплановые простои на 20–30% без роста затрат, повышению срока службы редукторов подъема и напора на 19,7%. Для добросовестного выполнения работ по техническому обслуживанию и ремонту следует большее внимание уделять диагностике оборудования, для чего требуется четкое планирование процедур, обучение персонала, обеспечение его необходимым эффективным оборудованием при автоматизации передачи данных в соответствующие базы, необходимы систематическое обучение персонала и унификация процедуры на предприятиях при безусловной заинтересованности и ответственности за принимаемые решения на всех уровнях горного предприятия без исключения.

Список литературы / References

1. Салимов А.Э., Иванов С.Л. Оценка эффективности технического обслуживания карьерных экскаваторов по доле ремонтных простоев. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2026;(5):52–65. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2026/5/05_2026_52-65.pdf (дата обращения: 27.03.2026).
Salimov A.E., Ivanov S.L. Evaluation of the efficiency of maintenance of quarry excavators by the share of repair downtime. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2026;(5):52–65. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2026/5/05_2026_52-65.pdf (accessed: 27.03.2026).

2. Хамидов О.У., Шибанов Д.А. Техническое обслуживание и ремонт карьерных экскаваторов по регламенту с учетом фактических условий и режимов их эксплуатации. *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2025;(12-3):152–167. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2025/12-3/152.pdf (дата обращения: 27.03.2026).
Khamidov O.U., Shibanov D.A. Regulated maintenance and repair of quarry excavators considering real-world conditions and operating modes. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2025;(12-3):152–167. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2025/12-3/152.pdf (accessed: 27.03.2026).

3. Баранникова И.В., Мажибрада И. Прогнозирование отказов одноковшовых экскаваторов на основе методов искусственного интеллекта. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(1):37–46. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2017/1/37_46_1_2017.pdf (дата обращения: 27.03.2026).
Barannikova I.V., Mazhibrada I. Predicting the probability of failure of excavators based on artificial intelligence methods. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2017;(1):37–46. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2017/1/37_46_1_2017.pdf (accessed: 27.03.2026).

4. Михайлов А.В., Казаков Ю.А., Козачков Г.С. Особенности размещения модуля измельчения при внутрикарьерной переработке торфяного сырья. *Горная промышленность*. 2024;(5):94–100. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-94-100
Mikhailov A.V., Kazakov Yu.A., Kozachkov G.S. Specific features of a grinding module location in in-pit processing of peat raw materials. *Russian Mining Industry.* 2024;(5):94–100. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-94-100

5. Вакулин Е.А., Заяц А.И., Беклемешев В.А., Ивашкевич В.А., Хажиев В.А., Байкин В.С. Оценка качества расследования и устранения причин отказов оборудования. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(S12):116–126. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-64-116-126
Vakulin E.A., Zayats A.I., Beklemeshev V.A., Ivashkevich V.A., Khazhiev V.A., Baikin V.S. Qualitative assessment of equipment failure cause finding and removal. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2018;(S12):116–126. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-64-116-126

6. Кац Б.А. Контроль процессов ТОиР: как добиться эффективности? *Управление производством*. 2009;(5-6):60–64. Режим доступа: https://itm.spb.ru/files/contr_proc_toir.pdf (дата обращения: 12.01.2024).
Kats B.A. Control of maintenance and repair processes: how to achieve efficiency? *Production Management.* 2009;(5-6):60–64. (In Russ.) Available at: https://itm.spb.ru/files/contr_proc_toir.pdf (accessed: 12.01.2024).

7. Антоненко И.Н., Кац Б.А. Анализ рисков и электронный журнал дефектов. *Молочная промышленность*. 2013;(5):30–33.
Antonenko I.N., Kats B.A. Analysis of risks and electronic defects register. Dairy Industry. 2013;(5):30–33. (In Russ.)

8. Родионов Ю.В., Филатов И.С., Воронин Н.В., Никитин Д.В., Остриков В.В., Ломовских А.Е. Метод определения степени износа и необходимости замены трансмиссионного масла в силовых механизмах. *Наука в центральной России*. 2020;(1):80–87. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2020-1-80-87
Rodionov Yu.V., Filatov I.S., Voronin N.V., Nikitin D.V., Ostrikov V.V., Lomovsky A.E. Method for determining the degree of wear and the need to replace transmission oil in power mechanisms. *Science in the central Russia*. 2020;(1):80–87. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2020-1-80-87

9. Иванов А.В., Селезнев М.В. К вопросу о периодичности смены трансмиссионных масел в процессе эксплуатации автомобилей. *Вестник НГИЭИ*. 2016;(10):94–102. Режим доступа: https://yadi.sk/i/gNkegzpB3488Pz (дата обращения: 12.01.2024).
Ivanov A.V., Seleznev M.V. To the question of the frequency of changing transmission oils in the process of operation of automobiles. *Bulletin NGIEI*. 2016;(10):94–102. (In Russ.) Available at: https://yadi.sk/i/gNkegzpB3488Pz (accessed: 12.01.2024).

10. Шишлянников Д.И., Иванов С.Л., Звонарев И.Е., Зверев В.Ю. Повышение эффективности применения выемочных и транспортирующих машин комбайновых комплексов калийных рудников. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(9):116–124. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-9-0-116-124
Shishlyannikov D.I., Ivanov S.L., Zvonarev I.E., Zverev V.Yu. Improving efficiency of shearing and hauling machines in longwall potash mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(9):116–124. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-9-0-116-124

11. Великанов В.С., Мусонов О.С., Панфилова О.Р., Ильина Е.А., Дёрина Н.В. Инструменты предиктивной аналитики в минимизации отказов горнотранспортного оборудования. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2021;19(4):5–15. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-5-15
Velikanov V.S., Musonov O.S., Panfilova O.R., Ilina E.A., Dyorina N.V. Predictive analytics tools in minimising mining equipment failures. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2021;19(4):5–15. (In Russ.) https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-5-15

12. Dagsuyu C., Oturakci M., Kokangül A. A new approach to Fine-Kinney method and an implementation study. *Alphanumeric Journal*. 2015;3(2):83–92. https://doi.org/10.17093/aj.2015.3.2.5000139953

13. Сергеев К.О. Анализ масла на содержание продуктов износа как метод диагностики технического состояния судового редуктора. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. 2020;(1):13–21. https://doi.org/10.24143/2073-1574-2020-1-13-21
Sergeev K.O. Testing oil for wear products presence as diagnostic method of operational state of marine gearbox unit. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2020;(1):13–21. (In Russ.) https://doi.org/10.24143/2073-1574-2020-1-13-21

14. Авершин А.А., Банник Н.В., Тугай В.В., Джумский А.В. Основные положения системы планово-предупредительных ремонтов в процессе эксплуатации горных машин и оборудования. *Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля*. 2023;(S1):187–192.
Avershin A.A., Bannik N.V., Tugai V.V., Dzhumsky A.V. The main provisions of the scheduled preventive repairs system in the operation of mining machinery and equipment. *Vestnik Lugansk Vladimir Dahl State University*. 2023;(S1):187–192. (In Russ.)

15. Дрыгин М.Ю. Анализ систем технического обслуживания и ремонта горного оборудования. *Горное оборудование и электромеханика*. 2020;(2):35–43. https://doi.org/10.26730/1816-4528-2020-2-35-43
Drygin M.Yu. Analysis of technical maintenance systems and repair of mining equipment. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2020;(2):35–43. (In Russ.) https://doi.org/10.26730/1816-4528-2020-2-35-43

16. Маньшев Д.А., Селезнев М.В. Результаты оценки показателей качества трансмиссионного масла при эксплуатации. *Вестник НГИЭИ*. 2018;(7):49–58. Режим доступа: https://yadi.sk/i/jLbdGasJ3YzvXb (дата обращения: 15.02.2026).
Man'shev D.A., Seleznev M.V. Results of estimation of quality indicators of transmission oil at operation. *Bulletin NGIEI*. 2018;(7):49–58. (In Russ.) Available at: https://yadi.sk/i/jLbdGasJ3YzvXb (accessed: 15.02.2026).

17. Селезнёв М.В., Евсеев А.А., Котова А.А., Балак Г.М., Потёмкина Е.В. Изменение физико-химических и эксплуатационных свойств трансмиссионного масла в ходе стендовых испытаний. *Нефтепереработка и нефтехимия*. 2025;(3):26–29. https://doi.org/10.24412/0233-5727-2025-3-26-29
Seleznev M.V., Evseev A.A., Kotova A.A., Balak G.M., Potemkina E.V. Changes in the physico-chemical and operational properties of transmission oil during bench tests. *Oil Refining and Petrochemistry*. 2025;(3):26–29. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/0233-5727-2025-3-26-29

18. Кубасов В.Г., Никитин Д.В. Оценка качества трансмиссионных масел в условиях реальной эксплуатации: оптический анализ и корреляция с пробегом транспортного средства. В кн.: *Молодёжная наука для решения актуальных задач АПК: материалы Всероссийского молодёжного научного форума, г. Рязань, 20–21 февраля 2025 г.* Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева; 2025. С. 181–184.

19. Ботян Е.Ю., Николайчук Л.А., Мартемьянова А.Н., Степук Е.И., Пушкарев А.Е. Совершенствование подхода к организации технических ремонтов карьерных автосамосвалов при помощи систем удаленного мониторинга их узлов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(12-2):137–152. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2025/12-2/12-2_2025_137-152.pdf (дата обращения: 15.02.2026).
Botyan E.Y., Nikolaichuk L.A., Martemyanova A.N., Stepuk E.I., Pushkarev A.E. Improving the approach to the organization of technical repairs of dump trucks using remote monitoring systems of their nodes. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(12-2):137–152. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2025/12-2/12-2_2025_137-152.pdf (accessed: 15.02.2026).

20. Barjoee S.S., Rodionov V. Comprehensive risk profiling of occupational harmful factors in the ceramic industry: A case study from Iran. *Environmental Science and Pollution Research*. 2026;33(8):3122–3151. https://doi.org/10.1007/s11356-026-37443-2

21. Шешукова Е.И., Шибанов Д.А., Иванов С.Л., Шишкин П.В. Оценка нагрузок приводов рабочего оборудования карьерного экскаватора (часть 2). *Горная промышленность*. 2024;(4):108–114. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-108-114
Sheshukova E.I., Shibanov D.A., Ivanov S.L., Shishkin P.V. Assessment of loads at the working attachment of a mine shovel (Part 2). *Russian Mining Industry*. 2024;(4):108–114. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-108-114

22. Михайлов А.В., Смирнов А.И. Анализ метода выемки торфяного сырья с откоса карьера. *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2026;(2-1):197–209. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2026/2-1/2-1_2026_197-209.pdf (дата обращения: 15.02.2026).
Mikhailov A. V., Smirnov A. I. Digging method analyzing organogenic materials mining by in-pit method. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2026;(2-1):197–209. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2026/2-1/2-1_2026_197-209.pdf (accessed: 15.02.2026).

23. Высогорец С.П. Разработка методики экспресс-анализа параметра качества изоляционного масла. *Надежность и безопасность энергетики.* 2018;11(1):41–47. https://doi.org/10.24223/1999-5555-2018-11-1-41-47
Vysogorets S.P. Development of method for quick analysis of isolation oil performance parameters. *Safety and Reliability of Power Industry.* 2018;11(1):41–47. (In Russ.) https://doi.org/10.24223/1999-5555-2018-11-1-41-47

24. Гаврилюк Е.А., Манцеров С.А. Разработка стратегии обслуживания и ремонта оборудования газотранспортного предприятия на основе индекса технического состояния. *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева.* 2017;(3):121–126.
Gavriliuk E.A., Mantserov S.A. Development of gas-transport equipment maintenance strategy on basis of technical state index. *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev.* 2017;(3):121–126. (In Russ.)

25. Поляков С.Ю. Оптимизация периодичности проведения анализов смазочных масел при эксплуатации газоперекачивающих агрегатов. *Автоматизация. Современные технологии.* 2022;76(5):216–219.
Polyakov S.Yu. Optimization of the analysis frequency for lubricating oils during the operation of gas compressor units. *Automation. Modern Technologies.* 2022;76(5):216–219. (In Russ.)

26. Кузнецов А.С., Разяпова Н.Ю., Разливинская С.В. Программно-алгоритмическая поддержка процессов обработки и анализа ИК-спектрограмм смазочных масел. *Международный научно-исследовательский журнал.* 2024;(12):125. https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.82
Kuznetsov A.S., Razyapova N.Y., Razlivinskaya S.V. Software-algorithmic support of processing and analysis of IR spectrograms of lubricating oils. *International Research Journal.* 2024;(12):125. (In Russ.) https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.82

27. Сафиуллин Р.Н., Парра С.А., Сафиуллин Р.Р., Присяжнюк М.С., Симонова Л.А. Метод построения автоматизированной системы для оценки эффективности функционирования горных машин на основе метода искусственного интеллекта. *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2026;(3):115–135. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2026/3/03_2026_115-135.pdf (дата обращения: 15.02.2026).
Safiullin P.N., Parra Z.A., Safiullin R.R., Prisyazhnyuk M.S., Simonova L.A. AI-based automated system design for efficiency evaluation of performance of mining machines. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2026;(3):115–135. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2026/3/03_2026_115-135.pdf (accessed: 15.02.2026).

28. Moubray J. *Reliability-centered Maintenance.* 2nd ed. New York: Industrial Press Inc.; 1997. 448 p.

Информация об авторах
Салимов Аббос Эркин угли – аспирант кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: salimoff.abbas@gmail.com
Иванов Сергей Леонидович – доктор технических наук, профессор кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-7014-2464; e-mail: Ivanov_SL@pers.spmi.ru
Шибанов Даниил Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-6203-0219

Information about the authors
Abbos E. Salimov – Postgraduate Student, Department of Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: salimoff.abbas@gmail.com
Sergey L. Ivanov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-7014-2464; e-mail: Ivanov_SL@pers.spmi.ru
Daniil A. Shibanov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-6203-0219

Информация о статье
Поступила в редакцию: 26.05.2026
Поступила после рецензирования: 23.06.2026
Принята к публикации: 16.07.2026

Article info
Received: 26.05.2026
Revised: 23.06.2026
Accepted: 16.07.2026