

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И МОНИТОРИНГА КАРЬЕРНОГО ТРАНСПОРТА

**ДЕМЬЯНЧУК Степан Вадимович**, заместитель исполнительного директора по техническому развитию, сервису и ремонту<sup>1</sup>; e-mail: sprints.spirit@mail.ru

**ГОРЕВ Андрей Эдливич**, доктор экономических наук, профессор<sup>2</sup>; e-mail: a-gorev@mail.ru

**ПОПОВА Ольга Валентиновна**, кандидат технических наук, доцент<sup>2</sup>; e-mail: o-popova@mail.ru

<sup>1</sup> ООО «Угольная компания Бурятии», Улан-Удэ

<sup>2</sup> Высшая школа транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург

Проведено комплексное исследование современного состояния, ключевых проблем и перспективных направлений развития автоматизированных систем управления и контроля карьерного транспорта. Актуальность темы обусловлена необходимостью кардинального повышения эффективности, безопасности и экологичности логистических цепочек угледобывающих предприятий в условиях растущей конкуренции и ужесточения требований к производству. В исследовании применялись методы системного анализа, экономико-математического моделирования, сравнительного анализа и прогнозирования. Научная новизна заключается в разработке интегральной критериальной модели для оценки эффективности автоматизированной системы управления и контроля транспорта, учитывающей не только прямые экономические выгоды, но и синергетический эффект от снижения рисков и повышения гибкости производства. В результате определены технологические (несовместимость оборудования, недостаточная надежность датчиков), экономические (высокие капитальные затраты, длительный срок окупаемости) и организационные (сопротивление персонала, недостаток компетенций) проблемы. В качестве перспектив обоснована целесообразность перехода к интеллектуальным автоматизированным системам управления и контроля транспорта на базе технологий интернета вещей, предиктивной аналитики и искусственного интеллекта. Предложена экономическая модель, демонстрирующая, что совокупный экономический эффект от внедрения таких систем формируется не только за счет прямой экономии на горюче-смазочных материалах и ремонте, но и благодаря предотвращению простоев и аварий, что в долгосрочной перспективе многократно превышает первоначальные инвестиции.

**Ключевые слова:** автоматизированные системы управления, контроль транспорта, угольная промышленность, карьерный транспорт, логистика, экономическая эффективность, интернет вещей, искусственный интеллект

DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-01-26-40

## ▼ Введение

Транспортная составляющая является одним из критически важных элементов технологической цепи угледобывающего предприятия, особенно в условиях открытой разработки, где на ее долю может приходиться до 50–60 % всех операционных затрат [1]. В современной конкурентной среде, характеризующейся волатильностью и растущими экологическими стандартами, оптимизация транспортных потоков становится ключевым резервом повышения рентабельности и устойчивости производства.

Традиционные системы управления карьерным и шахтным транспортом, основанные на эмпирическом опыте диспетчеров и локальном контроле, практически достигли своего предела эффективности. Они не позволяют в реальном времени реагировать на изменяющиеся условия, минимизировать непроизводительные простои, оптимизировать маршруты и расход топлива. В связи с этим внедрение комплексных автоматизированных систем управления и контроля транспорта (АСУКТ) переходит из разряда конкурентных преимуществ в категорию операционной необходимости.

Несмотря на очевидные потенциальные выгоды, массовое внедрение АСУКТ на карьерах сопряжено с рядом системных проблем, требующих глубокого научного осмысления и выработки практических решений. К ним относятся высокие капиталовложения, технологическая неоднородность парка оборудования, недостаточная зрелость отдельных решений и кадровые дефициты.

Научные исследования в данной области носят ярко выраженный прикладной характер и часто ведутся в тесном сотрудничестве с горнодобывающими компаниями («Норникель», «АЛРОСА», СУЭК, «Мечел» и др.) и производителями техники (БелАЗ, «Уралмаш-Инжиниринг»).

Основные направления исследований в этой области затрагивают создание интеллектуальных систем диспетчеризации [2], моделирование и оптимизацию грузопотоков в карьерах [3], исследования по повышению эффективности работы автотранспорта в карьерах на основе методов имитационного моделирования [4], мониторинг технического состояния карьерного транспорта и прогнозную аналитику [5], вопросы энергосбережения и экологии [6, 7], разработку алгоритмов для автономных карьерных систем [8].

В данных работах отмечается ряд ключевых проблем, таких как зависимость от импортных производителей [9], зарубежного программного обеспечения и аппаратных решений, что предопределяет необходимость поиска путей создания отечественных аналогов; недостаточность данных, так как для эффективного машинного обучения требуются огромные массивы качественных данных, которые компании не всегда готовы предоставлять ученым или которые технически сложно собрать; адаптация к суровым климатическим условиям, поскольку большинство российских месторождений находится в зонах с экстремально низкими температурами, что накладывает особые требования к датчикам, системам связи и аккумуляторам.

Учитывая вышесказанное, можно говорить об актуальности настоящего исследования, целью которого является выявление и систематизация ключевых проблем внедрения АСУКТ, а также разработка научно обоснованной концепции их дальнейшего развития.

## **Теоретические основы и современное состояние АСУКТ**

Автоматизированная система управления и контроля транспорта представляет собой комплекс, объединяющий аппаратные средства (датчики, GPS/ГЛОНАСС-трекеры, бортовые компьютеры, средства связи), программное обеспечение и регламенты, направленные на сбор, обработку и анализ информации о местоположении, текущем состоянии и работе транспортных единиц для выбора оптимальных управленческих решений [10].

Современные АСУКТ реализуют широкий спектр функций:

1. Мониторинг в реальном времени: отслеживание местоположения, скорости, расхода топлива, времени работы двигателя и прочих параметров [11].
2. Диспетчеризация и оптимизация маршрутов: автоматическое назначение заданий, построение оптимальных путей движения с учетом технологической карты карьера [12], загруженности и состояния дорог.
3. Управление производительностью: контроль выполнения плановых показателей по погрузке, перемещению и разгрузке породы и угля.
4. Технический контроль и прогнозное обслуживание: мониторинг критических параметров техники (давление в шинах, температура двигателя и т.д.), формирование прогноза отказов.
5. Анализ и отчетность: формирование детализированных отчетов о работе транспорта и водителей для принятия стратегических решений.

В основе архитектуры АСУКТ лежит трехуровневая модель:

1. Первый уровень включает бортовые устройства на транспорте, датчики, сенсоры.
2. Уровень сбора и передачи данных включает беспроводные сети связи (LTE, Wi-Fi, LoRaWAN), шлюзы.
3. Уровень управления и анализа включает центральный сервер, диспетчерские рабочие места, аналитические платформы [13].

Несмотря на активное развитие и продвижение автоматизации во многих прочих сферах, степень внедрения полнофункциональных АСУКТ на российских карьерах остается

неравномерной. Чаще всего внедряются системы мониторинга и диспетчеризации [14], в то время как функции предиктивного анализа и полноценного интеллектуального управления используются фрагментарно либо не используются совсем.

### Анализ проблем внедрения и эксплуатации АСУКТ

Проведенный в рамках настоящего исследования анализ позволяет выделить три группы проблем, сдерживающих развитие АСУКТ для карьеров.

#### Технологические проблемы

##### 1. Проблема интеграции и совместимости.

Парк транспортной техники на одном предприятии часто представлен оборудованием разных производителей и годов выпуска, что создает серьезные трудности для унификации бортового оборудования и интеграции данных в единую систему [15]. Отсутствие единых отраслевых стандартов на протоколы обмена данными дополнительно осложняет ситуацию.

2. Низкая надежность аппаратного обеспечения в условиях карьера.

Экстремальные условия эксплуатации (вибрация, запыленность, перепады температур, высокая влажность) приводят к ускоренному выходу из строя датчиков и средств связи, что требует использования специализированных, дорогостоящих компонентов с повышенным запасом прочности.

3. Недостаточное качество и полнота данных [16].

Сбои в работе датчиков, ограничение и потеря связи из-за удаленных расположений карьеров приводят к формированию неполных или недостоверных данных, что делает невозможным принятие корректных решений на их основе.

#### Экономические проблемы

Ключевым барьером в этом аспекте являются высокие капитальные затраты на внедрение АСУКТ, которые включают:

- стоимость бортового и инфраструктурного оборудования;
- лицензии на специализированное программное обеспечение;
- услуги по внедрению и настройке системы.

Операционные затраты на поддержание связи, обновление программного обеспечения, техническое обслуживание также являются значительными [17].

Для формализации экономической проблемы предлагается использовать модель расчета срока окупаемости инвестиций с учетом дисконтирования денежных потоков.

Общие инвестиционные затраты ( $I$ ) будут определены по формуле:

$$I = \sum (C_{об} + C_{ПО} + C_{вн}), \quad (1)$$

где  $C_{об}$  — затраты на оборудование;  $C_{ПО}$  — затраты на программное обеспечение;  $C_{вн}$  — затраты на внедрение системы.

Годовой экономический эффект от внедрения системы ( $\mathcal{E}$ ) формируется за счет нескольких статей и определяется по формуле:

$$\mathcal{E} = \Delta\mathcal{E}_{топл} + \Delta\mathcal{E}_{рем} + \Delta\mathcal{E}_{пр} + \Delta\mathcal{E}_{авар}, \quad (2)$$

где  $\Delta\mathcal{E}_{топл}$  — экономия на горюче-смазочных материалах за счет оптимизации маршрутов и стиля вождения;  $\Delta\mathcal{E}_{рем}$  — снижение затрат на ремонт за счет прогнозного обслуживания;  $\Delta\mathcal{E}_{пр}$  — сокращение затрат от простоев;  $\Delta\mathcal{E}_{авар}$  — снижение ущерба от крупноагрегатных поломок и аварий.

Тогда дисконтированный денежный поток (ДДП) за  $i$ -й год будет рассчитываться по формуле:

$$ДДП_i = \frac{\mathcal{E}_i}{(1+r)^i}, \quad (3)$$

где  $r$  — ставка дисконтирования.

При этом срок окупаемости определяется как момент, когда суммарный ДДП сравняется с  $I$ . Проблема заключается в том, что для многих предприятий расчетный срок окупаемости превышает приемлемые для них 3–5 лет, особенно если учитываются только прямые статьи экономии ( $\Delta\mathcal{E}_{топл}$  и частично  $\Delta\mathcal{E}_{рем}$ ) [18] без учета трудно определяемых эффектов от предотвращения аварий и простоев.

#### Организационные и кадровые проблемы

##### 1. Сопротивление персонала.

Внедрение АСУКТ часто воспринимается водительским составом и частью инженерно-

технического персонала как инструмент тотального контроля, что приводит к саботажу или формальному использованию системы.

#### 2. Дефицит компетенций.

Отсутствие на предприятиях специалистов, способных обслуживать, настраивать и интерпретировать данные сложных аналитических систем.

#### 3. Недостаточная зрелость процессов [19].

Внедрение АСУКТ требует пересмотра существующих регламентов управления транспортом. Так, без соответствующей организационной трансформации технологические инвестиции не дают полного эффекта.

### Перспективные направления развития АСУКТ

Современный этап технологического развития карьерной промышленности характеризуется переходом от локальной автоматизации отдельных процессов к созданию комплексных интеллектуальных систем управления транспортом. Данный переход обусловлен необходимостью достижения синергетического эффекта от интеграции цифровых технологий в единый управленческий контур.

В ходе проведенного исследования были выявлены ключевые технологические взаимосвязанные направления модернизации и развития интеллектуальных АСУКТ:

1. Внедрение систем предиктивной аналитики.

Современные подходы смещают акцент с планово-предупредительного обслуживания на техническое обслуживание по фактическому состоянию оборудования. На основе непрерывного мониторинга параметров работы узлов и агрегатов (вибрация, температурные режимы, химический состав масел) строятся прогнозные модели остаточного ресурса, что позволяет оптимально планировать ремонтные кампании и минимизировать риски внезапных отказов, являющихся основной причиной длительных простоев дорогостоящей техники.

2. Реализация адаптивного управления транспортными потоками.

Интеллектуальные системы диспетчеризации в реальном времени корректируют маршруты и задания карьерных самосвалов. Алгоритмы учитывают динамически изменя-

ющуюся производственную обстановку, такую как загрузка экскаваторов, состояние дорожного полотна, возникновение заторов. Такой подход, в отличие от статического планирования, обеспечивает постоянное поддержание высокой пропускной способности транспортной сети карьера.

3. Создание цифровых двойников транспортного комплекса.

Формирование виртуальных копий системы, точно отражающих ее физическое состояние и поведение, открывает новые возможности для оперативного управления. На цифровых двойниках проводятся эксперименты по оптимизации логистических схем, моделируются последствия изменения графика работ или ввода новой техники без риска для реального производственного процесса. Это позволяет находить оптимальные решения для сложных, многокритериальных задач.

4. Интеграция интернета вещей (IoT) в инфраструктуру [20].

Оснащение транспортных средств и инфраструктурных объектов (дорог, пунктов погрузки/разгрузки) сенсорами и устройствами связи создает единое информационное пространство. Сквозной поток данных от полевого уровня до центра управления является фундаментом для функционирования всех вышеперечисленных интеллектуальных сервисов.

Одним из примеров может служить система автоматизированного контроля технического состояния транспортных средств, основанная на динамических весовых коэффициентах. В этом случае каждый параметр  $x_i$  (например, давление масла, температура, вибрация и т. п.) получает динамический вес  $w_i(t)$  в определенный момент времени, который корректируется в реальном времени на основе значимости параметра для текущего состояния узла. Динамический вес определяется по формуле:

$$w_i(t) = \alpha w_i(t-1) + (1-\alpha) \frac{\partial R}{\partial x_i}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  — коэффициент забывания;  $R$  — риск отказа;  $x_i$  — эксплуатационный параметр.

Коэффициент забывания ( $\alpha$ ) — это параметр в адаптивных математических моделях

(например, в экспоненциальном сглаживании или алгоритмах машинного обучения), который определяет, насколько быстро модель «забывает» старые данные в пользу новых. Коэффициент используется в диапазоне 0–1 в качестве динамических весов параметров (в разрабатываемой модели) и при прогнозировании отказов.

Так, если  $\alpha = 0,9$ , модель на 90 % учитывает прошлые значения и только на 10 % реагирует на новые данные, при  $\alpha = 0,5$  прошлые и новые данные влияют одинаково, а при  $\alpha = 0,1$  модель практически не использует старые данные и быстро реагирует на новые. Таким образом, коэффициент забывания  $\alpha$  представляет собой «настройку консервативности» модели. Коэффициент позволяет гибко управлять тем, насколько быстро алгоритм адаптируется к изменениям в данных.

Можно считать, что для стабильных систем (например, исправный гидротрансформатор) значение коэффициента забывания  $\alpha$  принимается в диапазоне 0,8–0,99, чтобы игнорировать случайные колебания. Для систем с частыми изменениями (например, изношенный узел) значение коэффициента забывания  $\alpha$  принимается в диапазоне 0,1–0,5, чтобы быстро обнаруживать деградацию.

При этом в разрабатываемой модели значение данного коэффициента не может приниматься статическим, он должен изменяться в зависимости от контекста и конкретного агрегата, что добавит модели гибкость, точность и возможность адаптации. Однако в простых сценариях, где условия эксплуатации стабильны (например, диагностика новых узлов), допустимо использовать и статическое значение коэффициента.

Значение динамического коэффициента забывания можно вычислить по формуле:

$$\alpha(t) = \alpha_{\text{баз}} e^{\lambda R(t)}, \quad (5)$$

где  $\alpha_{\text{баз}}$  — начальное значение;  $\lambda$  — коэффициент чувствительности;  $R(t)$  — текущий риск отказа.

При высоком риске отказа коэффициент  $\alpha(t)$  снижается, и, как следствие, модель быстрее реагирует на новые данные. При снижении риска отказа до нормальных значений

коэффициент  $\alpha(t)$  приближается к начальному значению, и, как следствие, сохраняется инерция.

Коэффициент чувствительности  $\lambda$  в формуле динамического коэффициента забывания представляет собой параметр, который настраивается в зависимости от требований к скорости реакции модели на изменения. Его значение выбирается на основе следующих ключевых подходов:

1. Оптимизация на исторических данных.

На исторических данных (например, записи о прошлых отказах турбин) моделируется работа системы с разными значениями  $\lambda$  (например, от 0,01 до 1,0), после чего выбирается  $\lambda$ , при котором минимизируется количество пропущенных отказов и при этом удерживается приемлемый уровень ложных срабатываний.

2. Физическая интерпретация.

В этом случае  $\lambda$  можно связать с инерционностью системы.

Так, для медленно деградирующих узлов (например, редуктора) используется высокий  $\lambda$  (0,2–0,5), как следствие, модель медленнее забывает старые данные, чтобы избежать ложных тревог.

Для быстро выходящих из строя узлов (например, подшипников турбины) используется низкий  $\lambda$  (0,01–0,1), как следствие, модель резко снижает коэффициент забывания  $\alpha(t)$  при росте риска отказа.

Для инерционных систем коэффициент чувствительности  $\lambda$  можно определить по формуле:

$$\lambda = \frac{1}{\tau R_{\text{крит}}}, \quad (6)$$

где  $\tau$  — характерное время деградации узла;  $R_{\text{крит}}$  — пороговое значение риска отказа.

Таким образом, значение коэффициента чувствительности для каждого узла является константой, но при появлении новых данных его требуется обновлять.

После расчета динамических весовых коэффициентов можно определить интегрированный риск отказа по формуле:

$$R_{(t)} = \sum_{i=1}^n w_i(t) \left( \frac{x_i(t) - x_i^{\text{норм}}}{x_i^{\text{норм}}} \right)^2. \quad (7)$$

Общий риск отказа вычисляется как взвешенная сумма отклонений параметров от нормы. Критерий интегрального риска выполняет в модели не одну, а четыре ключевые функции:

1. Выбор сценария тестирования.
2. Приоритизация ремонтных работ.
3. Динамическая корректировка параметров модели.
4. Прогнозирование остаточного ресурса узла.

Для каждого агрегата опытным путем устанавливаются пороги допустимых значений критерия интегрального риска.

Как было сказано ранее, модель выбирает сценарий тестирования исходя из значений текущего риска отказа:

- если  $R(t) < R_{low}$  — виртуальные тесты;
- если  $R_{low} \leq R(t) < R_{high}$  — трековые испытания;
- если  $R_{high} \geq R(t)$  — диагностика в сервисе.

При этом  $R_{low}$  и  $R_{high}$  — это пороговые значения интегрального риска  $R(t)$ , которые определяют, какой тип диагностики необходимо применить к транспортному средству. Их ключевая роль — установить баланс между точностью и затратами на диагностику. Для каждого узла данные значения выбираются индивидуально с учетом ряда критериев.

1. Экономический критерий. Стоимость ложного срабатывания или стоимость пропущенного отказа.

2. Критерий безопасности. Для тормозной системы верхнее пороговое значение риска отказа ниже, чем для системы кондиционирования.

3. Критерий ресурса датчиков. Частые трековые испытания изнашивают технику.

После каждого цикла диагностики модель обновляет веса и параметры, используя данные о фактических отказах согласно формуле:

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \eta(y_{\text{факт}} - y_{\text{прогноз}}), \quad (8)$$

где  $\eta$  — скорость обучения;  $y$  — бинарный индикатор отказа.

Параметр  $\eta$  определяет, насколько сильно модель корректирует веса параметров после каждого цикла диагностики, и обычно находится в диапазоне  $0,001 \leq \eta \leq 0,1$ . Роль  $\eta$  в поведении модели приведена в табл. 1.

Бинарный индикатор отказа  $y$  представляет собой метку, которая указывает, произошел ли отказ узла на самом деле:  $y = 1$  — отказ зафиксирован,  $y = 0$  — узел исправен.

Значение данного индикатора может устанавливаться автоматически при срабатывании аварийных датчиков (например, падение давления ниже критического уровня) либо вручную после осмотра механиком (например, обнаружен износ подшипника турбины).

Помимо этого, опираясь на скорость изменения критерия интегрального риска отказа, можно рассчитать время прогнозируемого отказа по формуле (9):

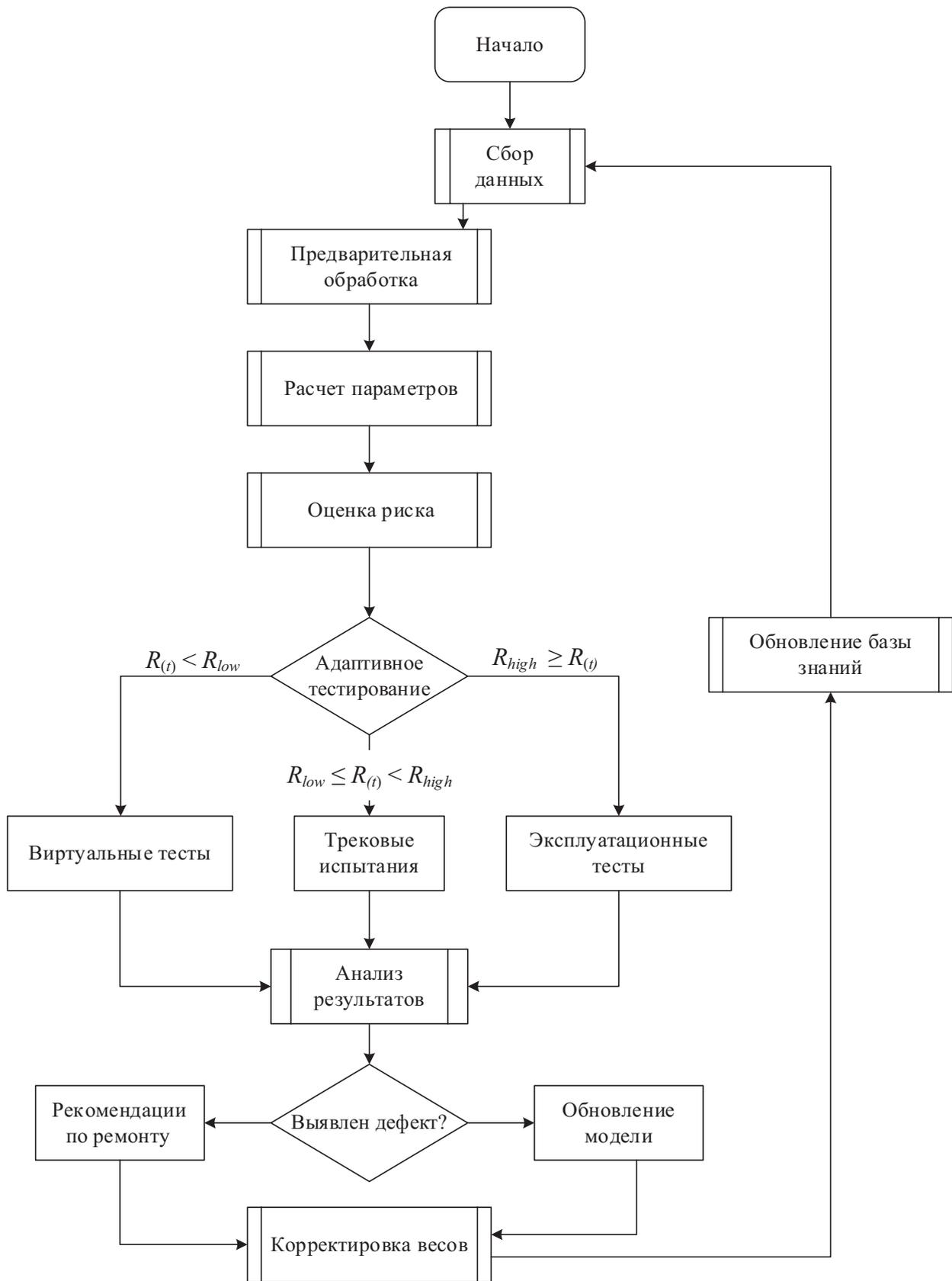
$$T_{\text{ост}} = \frac{R_{\text{крит}} - R(t)}{\Delta R / \Delta t}. \quad (9)$$

Графически предлагаемая математическая модель приведена на рис. 1.

Далее, на рис. 2–9 приведена детализация блоков разработанной математической модели.

**Таблица 1. Роль параметра скорости обучения в поведении модели**

Значение $\eta$	Поведение модели	Преимущества и недостатки
Высокое ( $\eta = 0,1$ )	Быстрая адаптация к новым данным, резкое изменение весов	Переобучение, резкое изменение весов, нестабильность
Низкое ( $\eta = 0,001$ )	Медленная, но точная корректировка. Подходит для стабильных систем	Медленная реакция на реальные отказы
Оптимальное ( $\eta = 0,01$ )	Баланс между скоростью и устойчивостью	Минимизация как ложных срабатываний, так и пропущенных отказов



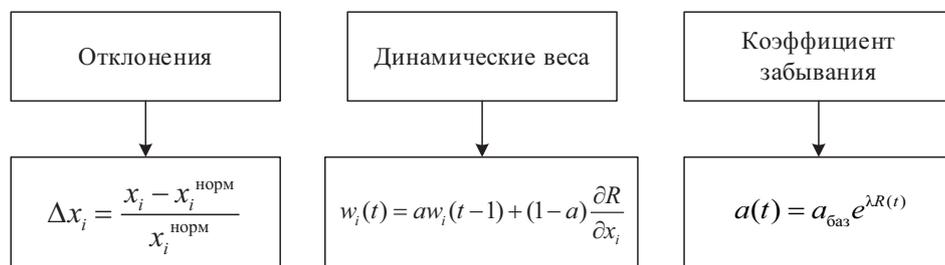
**Рис. 1.** Блок–схема математической модели автоматизированного контроля технического состояния транспортных средств



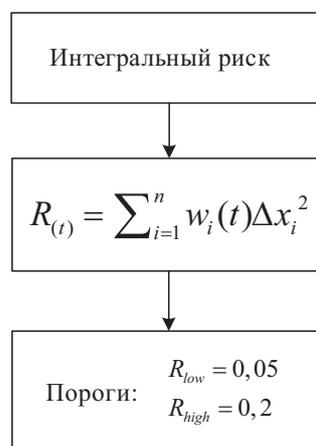
**Рис. 2.** Детализация блока «Сбор данных»



**Рис. 3.** Детализация блока «Предварительная обработка»



**Рис. 4.** Детализация блока «Расчет параметров»



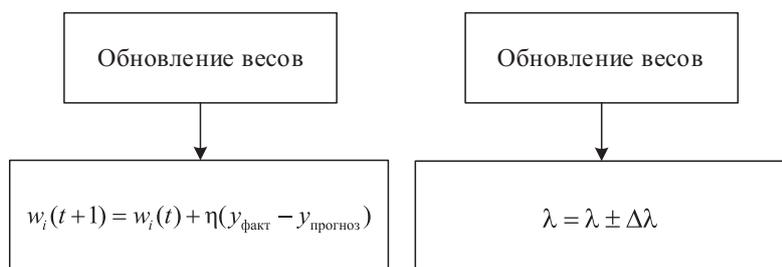
**Рис. 5.** Детализация блока «Оценка рисков»



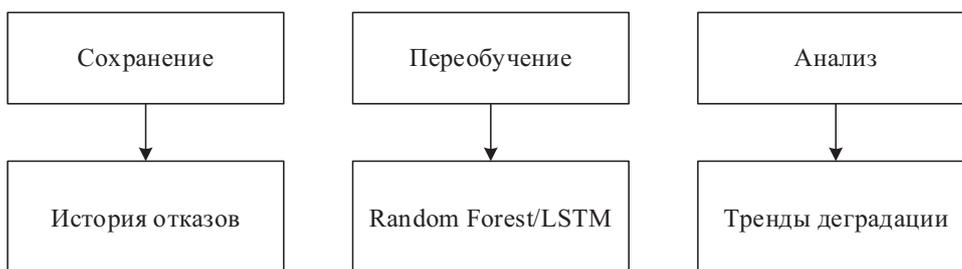
**Рис. 6.** Детализация блока «Адаптивное тестирование»



**Рис. 7.** Детализация блока «Анализ результатов»



**Рис. 8.** Детализация блока «Корректировка модели»



**Рис. 9.** Детализация блока «Обновление базы знаний»

Разработанная модель позволяет нивелировать указанные ограничения посредством реализации строгой математической формализации, а также четкой спецификации взаимосвязей с другими компонентами системы технического контроля.

**Интегральная модель эффективности**

Разработанная модель состоит из пяти ключевых модулей, интегрируемых в общий показатель эффективности.

**Модуль 1.** Финансово-экономический, учитывает оценку прямых денежных потоков и экономии и включает расчет:

- капитальных затрат, включающих затраты на оборудование (датчики, GPS/ГЛОНАСС, коммуникационные сети), программное обеспечение, лицензии, установку, пусконаладочные работы, обучение персонала;
- операционных затрат, включающих абонентскую плату за связь, техническое обслуживание, зарплату IT-персонала, обновление программного обеспечения;
- прямой экономии за счет снижения расхода топлива (%), снижения износа шин и компонентов (%), сокращения затрат на техническое обслуживание и ремонт (за счет прогнозного обслуживания), оптимизации фонда оплаты труда;
- роста доходов посредством увеличения объема вывезенной горной массы за счет оптимизации маршрутов и сокращения простоев [21];
- ключевых показателей, таких как NPV (чистая приведенная стоимость), IRR (внутренняя норма доходности), ROI (возврат на инвестиции), дисконтированный срок окупаемости.

**Модуль 2.** Производственно-технологический, учитывает оценку роста производительности и эффективности ключевых процессов и включает расчет:

- роста производительности за счет увеличения среднетехнической скорости, сокращения времени рейса, увеличения коэффициента использования грузоподъемности;
- повышения качества процесса за счет снижения отклонений от оптимального маршрута, сокращения времени погрузки-разгрузки, минимизации простоев (в том числе в очередях);
- степени использования парка за счет повышения коэффициента технической готовности парка, сокращения внеплановых простоев;
- ключевых показателей, к которым относятся тонно-километры за смену, среднетехническая скорость, время полного цикла, коэффициент технической готовности.

**Модуль 3.** Безопасность и экология, учитывает оценку снижения рисков и потерь и включает расчет:

- повышения промышленной безопасности за счет снижения количества инцидентов и аварий (столкновений, наездов), контроля за соблюдением скоростного режима и режима труда водителей;
- улучшения экологии за счет снижения расхода топлива, что, в свою очередь, ведет к снижению выбросов CO<sub>2</sub>, контроля за утечками горюче-смазочных материалов;
- ключевых показателей, таких как количество инцидентов, уровень выбросов CO<sub>2</sub> (тонн/год), количество нарушений внутренних регламентов.

**Модуль 4.** Организационный и кадровый, учитывает оценку влияния на структуру компании и персонал и включает:

- повышение трудовой дисциплины за счет объективного контроля работы операторов;
- повышение квалификации персонала за счет переквалификации водителей в операторы или сервисный персонал, роста требований к IT-специалистам;
- повышение культуры труда посредством перехода от ручного управления к управлению на основе данных;
- расчет ключевых показателей, таких как индекс удовлетворенности персонала, количество часов обучения на сотрудника, уровень текучести кадров.

**Модуль 5.** Стратегический и информационный, учитывает оценку долгосрочных конкурентных преимуществ и включает:

- управление на основе данных (качество и глубина собираемых данных для геолого-маркшейдерской службы, планирования горных работ, анализа эффективности);
- масштабируемость посредством возможности быстрого увеличения парка или интеграции новых технологий (беспилотный транспорт, IoT) [22];
- конкурентное преимущество за счет снижения себестоимости тонны горной массы, повышения гибкости и отказоустойчивости логистической цепи.

Блок-схема интегральной модели эффективности представлена на рис. 10.

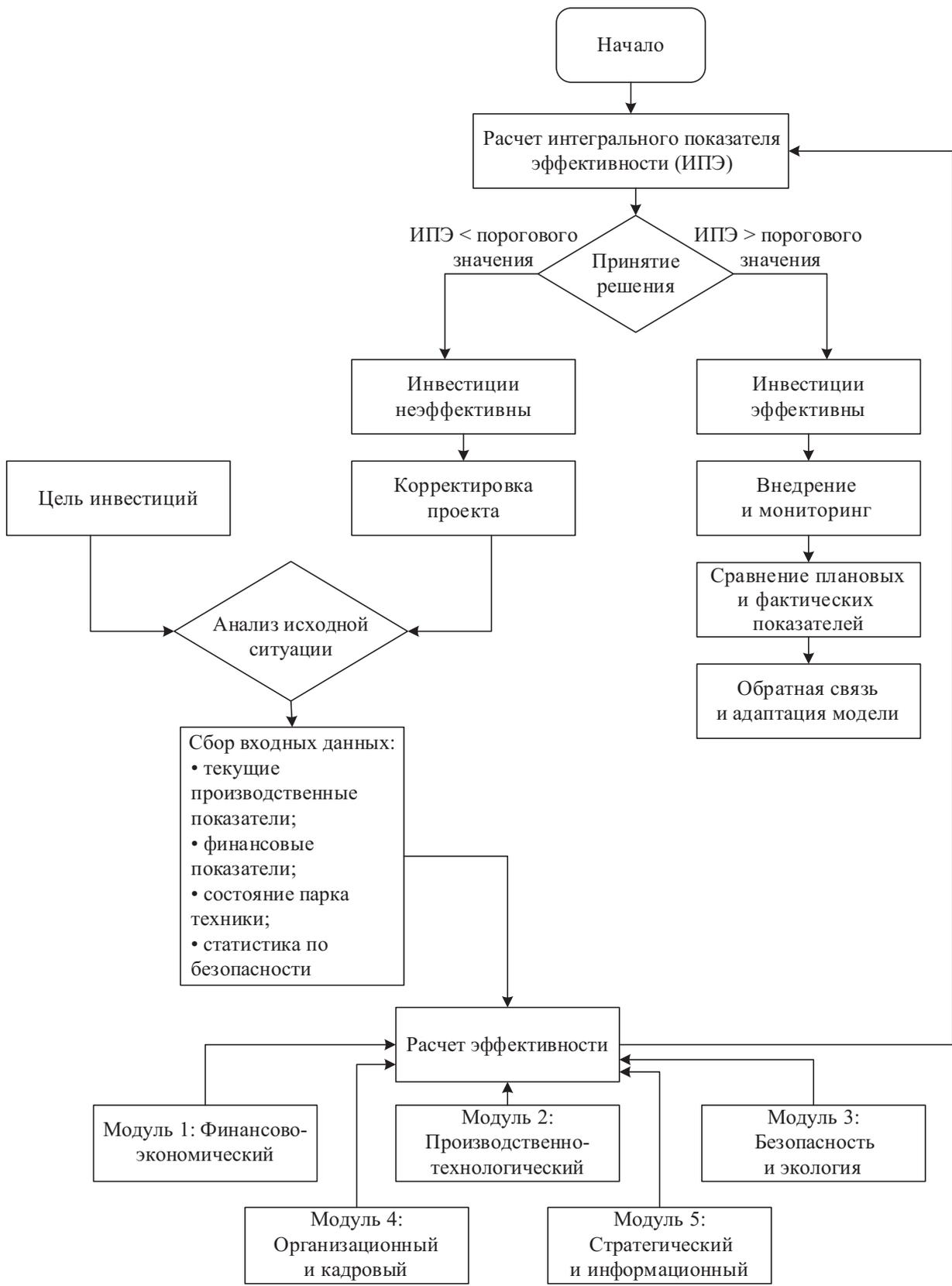


Рис. 10. Графическое представление интегральной модели эффективности

Представленная на рис. 10 модель включает ряд модулей и процессов.

В блоках «Старт» и «Анализ» процесс начинается с четкого определения целей инвестиций и анализа текущего состояния системы.

В блоке «Сбор данных» собираются количественные и качественные данные по всем аспектам работы карьерного транспорта.

В блоке «Модульный расчет» на основе собранных данных производится прогнозное моделирование эффекта от внедрения АСУКТ по каждому из пяти модулей. При этом расчеты ведутся как в натуральных, так и в денежных показателях.

В блоке «Агрегация» для каждого модуля назначается весовой коэффициент ( $W_i$ ), отражающий его важность для конкретного предприятия. Подобные весовые коэффициенты используются и в математической модели. Например, для компании с высоким уровнем аварийности модуль безопасности может иметь больший вес.

Следовательно, формула интегрального показателя эффективности (ИПЭ) может быть представлена следующим образом:

$$ИПЭ = \sum K_i W_i, \quad (10)$$

где  $K_i$  — нормализованные показатели эффективности по каждому модулю (например, от 0 до 1, где 1 — максимальный эффект);  $W_i$  — веса нормализованных показателей эффективности ( $W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 = 1$ ).

В блоке «Принятие решения» расчетное значение ИПЭ сравнивается с пороговым значением, установленным руководством компании на основе опыта работы.

Блок «Обратная связь» предусматривает, что после внедрения система мониторинга постоянно сравнивает фактические результаты с прогнозируемыми, что позволяет уточнять модель и принимать корректирующие решения.

### Заключение

В рамках проведенного исследования было выявлено, что, несмотря на наличие серьезных технологических, экономических и организационных барьеров, развитие автоматизированных систем управления и контроля карьерного

транспорта является необратимым и стратегически важным процессом.

Ключевой вывод работы заключается в том, что успешность внедрения АСУКТ зависит от комплексного подхода, сочетающего инвестиции в современные технологии (IoT, искусственный интеллект, предиктивная аналитика) с параллельным проведением организационных изменений и развитием кадрового потенциала.

Разработанная в статье интегральная модель экономической эффективности демонстрирует, что оценка инвестиций в АСУКТ должна выходить за узкие рамки прямого сокращения затрат и учитывать синергетический эффект от снижения операционных рисков и повышения гибкости всего производственного комплекса.

Разработанная и предлагаемая к реализации интегральная модель позволяет перейти от упрощенного финансового анализа к комплексной оценке, учитывающей все ключевые аспекты влияния интеллектуальных систем на бизнес. Она делает процесс принятия инвестиционных решений более обоснованным, прозрачным и ориентированным на достижение долгосрочных стратегических целей предприятия.

Перспективой дальнейших исследований является детальная проработка методик количественной оценки трудноизмеримых компонентов эффекта, таких как ДДП<sub>риск</sub> и ДДП<sub>флекс</sub>, а также разработка отраслевых стандартов для обеспечения совместимости компонентов АСУКТ от разных производителей. ▲

### Список источников

1. Пешкова, М.Х. Методология обоснования области изменения основных показателей работы угольных предприятий, обеспечивающих эффективное внедрение новых технологий / М.Х. Пешкова, Ж.К. Галиев, Н.В. Галиева // Уголь. — 2018. — № 7 (1108). — С. 32–37. — DOI 10.18796/0041-5790-2018-7-32-37. — EDN UTKFIM.
2. Цымблер, М.Л. Восстановление пропущенных значений временного ряда на основе совместного применения аналитических алгоритмов и нейронных сетей / М.Л. Цымблер, А.А. Юртин // Вычислительные методы и программирование. — 2023. — Т. 24, № 3. — С. 243–259. — DOI 10.26089/NumMet.v24r318. — EDN BZYCYZ.

3. Кузнецов, А.С. О задачах производственно-транспортного планирования на карьерах / А.С. Кузнецов, О.Б. Кортелев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2005. — № 4–2 (49). — С. 118–120. — EDN PXSTMH.
4. Хорешок, А.А. Об изменении эффективной производительности экскаваторов при использовании карьерных самосвалов с различной вместимостью кузова / А.А. Хорешок, Д.М. Дубинкин, С.О. Марков, М.А. Тюленев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2021. — № 6 (148). — С. 85–93. — DOI 10.26730/1999-4125-2021-6-85-93. — EDN IWWML.
5. Клебанов, А.Ф. Комплексный подход к удаленному мониторингу технического состояния и режимов эксплуатации карьерного автосамосвала / А.Ф. Клебанов, Д.Н. Сиземов, М.В. Кадочников // Горная промышленность. — 2020. — № 2. — С. 75–81. — DOI 10.30686/16099192-2020-2-75-81. — EDN FZDOLR.
6. Современный автотранспорт горнопромышленного комплекса: проблемы и решения / И.В. Макарова [и др.] // Горная промышленность. — 2025. — № 15. — С. 28–33. — DOI 10.30686/1609-9192-2025-15-28-33. — EDN WHYNMW.
7. Чирков, М.А. Определение степени влияния различных факторов по объему затрачиваемой энергии на движение карьерных автосамосвалов / М.А. Чирков // Вестник науки. — 2025. — Т. 2, № 6 (87). — С. 1931–1938. — EDN JWBYIG.
8. Дубинкин, Д.М. Основы цифрового создания автономных карьерных самосвалов / Д.М. Дубинкин // Горное оборудование и электромеханика. — 2022. — № 2 (160). — С. 39–50. — DOI 10.26730/1816-4528-2022-2-39-50. — EDN ZUKXMF.
9. Осьмин, В.В. Оптимизация транспортировки горной массы в условиях глубоких карьеров на основе комбинированной экономико-математической модели / В.В. Осьмин // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2025. — № 2. — С. 329–335. — EDN CPXOGZ.
10. Выбор комплекса горнотранспортного оборудования для карьеров по добыче известняка в сложных горнотехнических условиях / А.Н. Волокитин [и др.] // Рациональное освоение недр. — 2021. — № 5 (61). — С. 59–65. — DOI 10.26121/RON.2021.72.91.007. — EDN ESASMM.
11. Курнаков, К.А. Внедрение систем по контролю эксплуатации, мониторинга и диспетчеризации автотранспорта. Автоматизация карьерного транспорта / К.А. Курнаков, С.Д. Соколов // Экономика и социум. — 2016. — № 6–1 (25). — С. 1213–1215. — EDN WMTBJV.
12. Макарова, И.В. Автомобильный транспорт в горнопромышленном комплексе: проблемы и решения / И.В. Макарова, А.С. Баринов, Г.Р. Мавляудинова, Л.М. Габсалихова // Транспорт. Взгляд в будущее — TFV-24. : сборник научных статей международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 7–8 ноября 2024 года). — СПб. : Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 2024. — С. 146–149. — EDN WLNEIS.
13. Воронов, Ю.Е. Диспетчеризация в карьерных экскаваторно-автомобильных комплексах с беспилотным транспортом / Ю.Е. Воронов, А.Ю. Воронов, Д.М. Дубинкин, О.С. Максимова // Уголь. — 2023. — № 9 (1171). — С. 75–83. — DOI 10.18796/0041-5790-2023-9-75-83. — EDN NYKHNY.
14. Barnewold, L. Identification of Digital Technologies And Digitalisation Trends in the Mining Industry / L. Barnewold, B.G. Lottermoser // International Journal of Mining Science and Technology. — 2020. — Vol. 30, no. 6. — Pp. 747–757. — DOI 10.1016/j.ijmst.2020.07.003. — EDN VYPLPV.
15. Цивилева, А.Е. Пути решения проблем цифровой трансформации предприятий угледобывающей промышленности / А.Е. Цивилева // Векторы развития современной экономики: проблемы теории и практики : материалы Международной научно-практической конференции (Москва, 23 ноября 2021 года). — М. : Московский политех, 2021. — С. 228–232. — EDN XVFIHZ.
16. Wang, H. Novel Routing Algorithm for Autonomous Vehicles in Smart Transportation System / H. Wang // Journal of Ubiquitous Computing and Communication Technologies. — 2021. — Vol. 3, no. 3. — Pp. 164–179. — DOI 10.36548/jucct.2021.3.002. — EDN LNEQPK.
17. The Digital Mine: From Vision to Value // Accenture Strategy Report. 2021. — URL: <https://www.accenture.com/us-en/insights/resources/digital-mine-value> (date of access: 15.05.2024).
18. Diagnosis and Troubleshooting of Automotive Electrical, Electronic and Computer Systems (5th Edition), 2009. — URL: [https://openlibrary.org/books/OL38223236M/Diagnosis\\_and\\_troubleshooting\\_of\\_automotive\\_electrical\\_electronic\\_and\\_computer\\_systems](https://openlibrary.org/books/OL38223236M/Diagnosis_and_troubleshooting_of_automotive_electrical_electronic_and_computer_systems) (date of access: 08.08.2025).
19. Fleetrun: решение для учета технического обслуживания. — URL: <https://wialon.com/ru/fleet-maintenance-management?ysclid=m2ll3whfn971405892> (date of access: 14.11.2025).
20. Патраков, П.А. Мониторинг инфраструктурных объектов с использованием информационных технологий / П.А. Патраков // Вестник науки. — 2025. — Т. 2, № 5 (86). — С. 880–885. — EDN XZNDMG.

21. Тищенко, М.А. Оптимизация материальных затрат в добывающих отраслях / М.А. Тищенко // Вестник Бурятского государственного университета. Экономика и менеджмент. — 2024. — № 3. — С. 126–135. — DOI 10.18101/2304-4446-2024-3-126-135. — EDN FSLKGS.
22. Балакин, Д.А. Диагностика циклических систем с помощью алгоритма, основанного на функциях Гаусса-Эрмита / Д.А. Балакин, В.В. Штыков // Цифровая обработка сигналов. — 2018. — № 2. — С. 59–62. — EDN XUNPID.

*TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH. 2026. Vol. 12, no. 1, pp. 26–40  
DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-01-26-40*

### Research into the Challenges and Prospects for Developing Automated Control and Monitoring Systems for Quarry Haulage Transport

#### Information about authors

**Demyanchuk S. V.**, Deputy Executive Director for Technical Development, Service, and Repair<sup>1</sup>. E-mail: sprints.spirit@mail.ru

**Gorev A. E.**, Doctor of Economics, Professor<sup>2</sup>. E-mail: a-gorev@mail.ru

**Popova O. V.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor<sup>2</sup>. E-mail: o-popova@mail.ru

<sup>1</sup> Buryatia Coal Company, Ulan-Ude

<sup>2</sup> School of Transport of the Institute of Machine Engineering, Materials and Transport of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg

**Abstract:** this paper provides a comprehensive study of the current state, principal challenges, and prospective directions for developing automated control and monitoring systems for open-pit transportation. The relevance of the study is underscored by the pressing need to markedly enhance the efficiency, safety, and environmental sustainability of logistics chains in coal mining enterprises amid intensifying competition and increasingly stringent production requirements. The research employs systems analysis, economic-mathematical modelling, comparative analysis, and forecasting. The scientific novelty lies in the development of an integrated criterion model for evaluating the effectiveness of automated transportation control and monitoring systems, which accounts not only for direct economic gains but also for the synergistic benefits arising from risk mitigation and improved production flexibility. This has led to the identification of technological issues such as incompatible equipment and unreliable sensors, as well as economic issues such as high capital costs and long payback periods, and organizational issues such as employee resistance and a lack of sufficient skills. Moving to intelligent automated transport management and control systems based on artificial intelligence, predictive analytics, and Internet of Things technologies is a logical future option. An economic model has been put forward that shows that the overall economic impact of implementing these types of systems is generated by preventing downtime and accidents as well as by directly saving money on repairs, fuel and lubricants. Eventually, this will significantly exceed the initial investments.

**Keywords:** automated management systems, transportation control, coal industry, quarry haulage transport, logistics, economic efficiency, Internet of Things, artificial intelligence

#### References

- Peshkova, M. Kh. Metodologiya obosnovaniya oblasti izmeneniya osnovnykh pokazatelej raboty ugol'nykh predpriyatij, obespechivayushchikh effektivnoe vnedrenie novykh tekhnologij / M. Kh. Peshkova, Zh. K. Galiev, N. V. Galieva // Ugol'. — 2018. — № 7 (1108). — С. 32–37. — DOI 10.18796/0041-5790-2018-7-32-37. — EDN UTKFIM. (In Russian)
- Tsymler, M. L. Vosstanovlenie propushchennykh znachenij vremennogo ryada na osnove sovmestnogo primeneniya analiticheskikh algoritmov i nejronnykh setej / M. L. Tsymler, A. A. Yurtin // Vychislitel'nye metody i programmirovaniye. — 2023. — Т. 24, no. 3. — С. 243–259. — DOI 10.26089/NumMet.v24r318. — EDN BJZYCZ. (In Russian)
- Kuznetsov, A. S. O zadachakh proizvodstvenno-transportnogo planirovaniya na kar'erakh / A. S. Kuznetsov, O. B. Kortelev // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. — 2005. — No. 4–2 (49). — С. 118–120. — EDN PXSTMH. (In Russian)
- Khoreshok, A. A. Ob izmenenii effektivnoj proizvoditel'nosti ekskavatorov pri ispol'zovanii kar'ernykh samosvalov s razlichnoj vmestimost'yu kuzova / A. A. Khoreshok, D. M. Dubinkin, S. O. Markov, M. A. Tyulenev // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. — 2021. — No. 6 (148). — С. 85–93. — DOI 10.26730/1999-4125-2021-6-85-93. — EDN IJWWML. (In Russian)
- Klebanov, A. F. Kompleksnyj podkhod k udalennomu monitoringu tekhnicheskogo sostoyaniya i rezhimov ekspluatatsii kar'ernogo avtosamosvala / A. F. Klebanov, D. N. Sizemov, M. V. Kadochnikov // Gornaya promyshlennost'. — 2020. — No. 2. — С. 75–81. — DOI 10.30686/16099192-2020-2-75-81. — EDN FZDOLR. (In Russian)
- Sovremennyy avtotransport gornopromyshlennogo kompleksa: problemy i resheniya / I. V. Makarova [i dr.] // Gornaya promyshlennost'. — 2025. — No. 15. — С. 28–33. — DOI 10.30686/1609-9192-2025-15-28-33. — EDN WHYNMW. (In Russian)
- Chirkov, M. A. Opredelenie stepeni vliyaniya razlichnykh faktorov po ob'em u zatrachivaemoy energii na dvizhenie kar'ernykh avtosamosvalov / M. A. Chirkov // Vestnik nauki. — 2025. — Т. 2, no. 6 (87). — С. 1931–1938. — EDN JWBWYG. (In Russian)
- Dubinkin, D. M. Osnovy tsifrovogo sozdaniya avtonomnykh kar'ernykh samosvalov / D. M. Dubinkin // Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. — 2022. — No. 2 (160). — С. 39–50. — DOI 10.26730/1816-4528-2022-2-39-50. — EDN ZUKXMF. (In Russian)
- Os'min, V. V. Optimizatsiya transportirovki gornoj massy v usloviyakh glubokikh kar'erov na osnove kombinirovannoy ekonomiko-matematicheskoy modeli / V. V. Os'min // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle. — 2025. — No. 2. — С. 329–335. — EDN CPXOGZ. (In Russian)
- Vybor kompleksa gornotransportnogo oborudovaniya dlya kar'erov po dobyche izvestnyaka v slozhnykh gornotekhnicheskikh usloviyakh / A. N. Volokitin [i dr.] // Ratsional'noe osvoenie nedr. — 2021. — No. 5 (61). — С. 59–65. — DOI 10.26121/RON.2021.72.91.007. — EDN ESASMM. (In Russian)
- Kurnakov, K. A. Vnedrenie sistem po kontrolyu ekspluatatsii, monitoringa i dispatcherizatsii avtotransporta. Avtomatizatsiya kar'ernogo transporta / K. A. Kurnakov, S. D. Sokolov // Ekonomika i sotsium. — 2016. — No. 6–1 (25). — С. 1213–1215. — EDN WMTBJV. (In Russian)
- Makarova, I. V. Avtomobil'nyj transport v gornopromyshlennom komplekse: problemy i resheniya / I. V. Makarova, A. S. Barinov, G. R. Mavlyautdinova, L. M. Gabsalikhova // Transport. Vzgl'yad v budushchee — TFV-24 : sbornik nauchnykh statej mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii (Sankt-Peterburg, 7–8 noyabrya 2024 goda). — SPb. : Sankt-Peterburgskij gornyj universitet imperatritsy Ekateriny II, 2024. — С. 146–149. — EDN WLNEIS. (In Russian)
- Voronov, Yu. E. Dispetcherizatsiya v kar'ernykh ekskavatorno-avtomobil'nykh kompleksakh s bespilotnym transportom / Yu. E. Voronov, A. Yu. Voronov, D. M. Dubinkin, O. S. Maksimova // Ugol'. — 2023. — No. 9 (1171). — С. 75–83. — DOI 10.18796/0041-5790-2023-9-75-83. — EDN NYKHNY. (In Russian)

14. Barnewold, L. Identification of Digital Technologies and Digitalisation Trends in the Mining Industry / L. Barnewold, B. G. Lottermoser // *International Journal of Mining Science and Technology*. — 2020. — Vol. 30, no. 6. — Pp. 747–757. — DOI 10.1016/j.ijmst.2020.07.003. — EDN VYPLPV.
15. Tsivileva, A. E. Puti resheniya problem tsifrovoy transformatsii predpriyatij ugledobyvayushchej promyshlennosti / A. E. Tsivileva // *Vektory razvitiya sovremennoj ekonomiki: problemy teorii i praktiki : materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii (Moskva, 23 noyabrya 2021 goda)*. — M. : Moskovskij politekh, 2021. — S. 228–232. — EDN XVFIHZ. (In Russian)
16. Wang, H. Novel Routing Algorithm for Autonomous Vehicles in Smart Transportation System / H. Wang // *Journal of Ubiquitous Computing and Communication Technologies*. — 2021. — Vol. 3, no. 3. — Pp. 164–179. — DOI 10.36548/jucct.2021.3.002. — EDN LNEQPK.
17. The Digital Mine: From Vision to Value // *Accenture Strategy Report*. 2021. URL: <https://www.accenture.com/us-en/insights/resources/digital-mine-value> (date of access: 15.05.2024).
18. *Diagnosis and Troubleshooting of Automotive Electrical, Electronic, and Computer Systems (5th Edition)*, 2009. URL: [https://openlibrary.org/books/OL38223236M/Diagnosis\\_and\\_troubleshooting\\_of\\_automotive\\_electrical\\_electronic\\_and\\_computer\\_systems](https://openlibrary.org/books/OL38223236M/Diagnosis_and_troubleshooting_of_automotive_electrical_electronic_and_computer_systems) (date of access: 08.08.2025)
19. Fleetrun: reshenie dlya ucheta tekhnicheskogo obsluzhivaniya. URL: <https://wialon.com/ru/fleet-maintenance-management?ysclid=m2l13whfn971405892> (date of access: 14.11.2025).
20. Patrakov, P. A. Monitoring infrastrukturykh ob'ektov s ispol'zovaniem informatsionnykh tekhnologij / P. A. Patrakov // *Vestnik nauki*. — 2025. — T. 2, no. 5 (86). — S. 880–885. — EDN XZNDMG. (In Russian)
21. Tishchenko, M. A. Optimizatsiya material'nykh zatrat v dobyvayushchikh otraslyakh / M. A. Tishchenko // *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika i menedzhment*. — 2024. — No. 3. — S. 126–135. — DOI 10.18101/2304-4446-2024-3-126-135. — EDN FSLKGS. (In Russian)
22. Balakin, D. A. Diagnostika tsiklicheskih sistem s pomoshch'yu algoritma, osnovannogo na funktsiyakh Gaussa-Ermita / D. A. Balakin, V. V. Shtykov // *Tsifrovaya obrabotka signalov*. — 2018. — No. 2. — S. 59–62. — EDN XUNPID. (In Russian)