



ОБЗОР ИННОВАЦИОННЫХ ПОДХОДОВ К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАРЬЕРНОГО АВТОТРАНСПОРТА

Г.Б. Умарова ¹, Н.М. Мырзабеков ², Н.Р. Бақытжанов ^{1*}, С.С. Кабылдина ¹

¹АО «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт», Астана, Казахстан;

²НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», Астана, Казахстан

*Корреспондент автор: nurzhan_19-92@mail.ru

Аннотация. В обзоре рассмотрены современные инновационные решения, направленные на повышение эффективности карьерного автомобильного транспорта. Особое внимание уделено автоматизации и автономизации автопарка, внедрению электрических и гибридных приводов, а также использованию цифровых технологий мониторинга и аналитики (IoT, предиктивное техническое обслуживание). Отдельный раздел посвящён организационно-управленческим подходам и экологическим инициативам, которые позволяют комплексно улучшать работу предприятий. На основе открытых источников проведён анализ практических кейсов, включающий примеры из международного и отечественного опыта, где продемонстрированы количественные оценки влияния технологий на производительность, затраты и уровень безопасности. Рассматриваются как технические, так и социально-экономические аспекты применения инноваций. Ключевые выводы: наибольший положительный эффект достигается при синергетическом сочетании новых технических решений с цифровыми инструментами управления. В то же время остаются определённые барьеры внедрения: высокие капитальные затраты, необходимость развития инфраструктуры и подготовка квалифицированных кадров.

Ключевые слова: карьерный автотранспорт, автономизация, предиктивное техническое обслуживание, электрификация, эффективность эксплуатации.

Введение

Карьерный автомобильный транспорт обеспечивает перемещение горной массы с места добычи до места складирования или переработки и во многих горнодобывающих операциях составляет основную долю эксплуатационных затрат. Современные вызовы — рост цен на дизельное топливо, постоянно повышающиеся требования снижения выбросов, дефицит квалифицированных операторов и требования к повышению показателей технической эксплуатации — стимулируют постоянного и внимательного изучения, а также поиск и внедрение инновационных решений. В статье проводится обзор технологических направлений и оценивается их потенциал повышения эффективности [1].

Методология

Материалы для обзора были отобраны из открытых источников: пресс-релизов производителей техники, отраслевых отчётов, тематических публикаций и описаний практических примеров из отрасли. Критерии отбора включали: практическую реализуемость, наличие опытной или промышленной эксплуатации, подтверждённые показатели эффективности, такие как публичные данные о тоннаже, сокращении простоев или экономии топлив, а также новизну - отбирались публикации за последние 10 лет. Для

ключевых утверждений использованы официальные данные производителей и отчёты, доступные в сети.

Обобщение данных

Развитие автономности грузоперевозок — одна из наиболее масштабно реализуемых инноваций в горнодобывающей отрасли. Такие компании, как БелАЗ, Komatsu и Caterpillar активно включены в производство роботизированных карьерных автосамосвалов, и в настоящее время лидируют на рынке и активно набирают популярность [2].

Согласно данным Клебанов Д.А и др. около 1000 автономных карьерных автосамосвалов к введены в эксплуатацию в различных местах производства в мире [3]. Наиболее популярными из них можно считать самосвалы компаний Komatsu и Caterpillar. Согласно отчетам компании Komatsu, более 750 автономных самосвалов были введены в промышленную эксплуатацию и перевезли более 10 млрд метрических тонн материала; некоторые единицы отработали свыше 100 000 автономных часов [4]. Эти внедрения демонстрируют положительное влияние на безопасность, стабильность операций и снижение износа компонентов. Аналогично, как утверждают производители Caterpillar, решения Caterpillar MineStar используются в ряде карьеров и позволяют организовать автономную работу автопарка с уменьшением холостых пробегов и простоев [5]. В то же время, можно так же отметить следующие преимущества автономных самосвалов, таких как:

- снижение риска инцидентов и травматизма за счёт исключения человеческого фактора в зонах повышенной опасности;

- сокращение холостых пробегов и более равномерная эксплуатационная нагрузка на машины, что не гарантируется пилотируемыми самосвалами в силу различий опытов водителей;

- возможность круглосуточной эксплуатации и повышения оперативной доступности парка [1].

Важно так же применение электрификации и гибридных технологий в производствах: Переход на электрические и гибридные силовые установки рассматривается как ключ к снижению эмиссий и операционных затрат.

Под гибридной силовой установкой подразумевается силовая установка, использующая несколько источников энергии для привода транспортного средства [6]. Обычно в качестве таких установок выступают двигатель внутреннего сгорания (ДВС) и электродвигатель [7].

Такие решения набирают обороты в производстве по всему миру, например, производители, включая BELAZ, представляют батарейные и гибридные модели (например, концепты и пилотные испытания BELAZ-7558E, БЕЛАЗ-7513М и других образцов) [8-9], а крупные горнодобывающие компании (Fortescue, ВНР и др.) инвестируют в закупку батарейных автомобилей и инфраструктуру быстрой зарядки. На данный момент троллейбусы являются практичным промежуточным решением для участков с устойчивым профилем подъёма/спуска [10-11].

Применение данных технологий и инженерных решений, позволит добиться положительных эффектов, а именно:

- снижение расхода дизтоплива и CO₂ (в зависимости от источника электроэнергии);

- уменьшение шума и теплового воздействия;

- изменение модели технического обслуживания (батарей, силовая электроника) [8].

Вместе с этим развитие вышеупомянутых инновационных решений соответственно сопровождаются и развитием цифровых платформ, таких как IoT, телеметрия, предиктивное ТО. Системы мониторинга в режиме реального времени (телеметрия), объединённые с алгоритмами анализа больших данных и машинного обучения, позволяют прогнозировать отказные состояния (Предиктивное ТО), оптимизировать интервалы ТО и сокращать незапланированные простои. Отраслевые отчёты и кейсы показывают снижение

незапланированных простоев до 15–30% при внедрении таких систем [1, 12]. Сравнительная диаграмма эффектов технологий представлена в рис. 1.

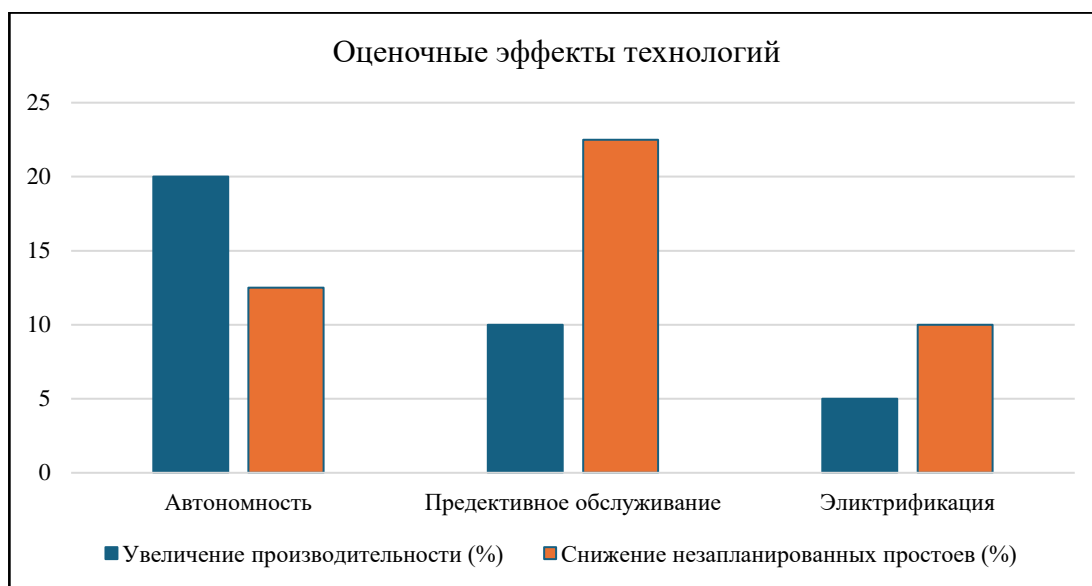


Рисунок 1 – Оценочные средние эффекты технологий (увеличение производительности и снижение незапланированных простоев)

Наряду с цифровыми решениями важную роль играют и инфраструктурные, а также организационные меры. Так, интеграция систем планирования карьера, маршрутизации и управления ресурсами (например, управления автопарком) обеспечивает оптимизацию графиков циклов перевозки и загрузки-выгрузки, уменьшение простоя погрузочной техники и повышение коэффициента использования автопарка. Параллельно требуется подготовка персонала и адаптация рабочих процессов при внедрении автономных и электрических машин [12].

Эффективность подобных решений подтверждается данными из отраслевых отчётов и реальных кейсов: на основе открытых источников можно выделить типичные диапазоны эффектов, наблюдаемых при их внедрении. Например, автономизация обеспечивает улучшение производительности и сокращение операционных потерь в пределах 10–30% в различных проектах (зависит от исходной операционной эффективности и масштаба) [1, 3–4]. Цифровое предиктивное ТО позволяет снизить незапланированные простои на 15–30% и повысить коэффициент технической готовности [1]. Электрификация дает потенциальное снижение расходов на энергию/топливо до 20% и значительное снижение локальных выбросов (при переходе с дизеля на электричество), при этом капитальные затраты и потребность в инфраструктуре остаются существенными барьерами [9, 11].

Сравнительная характеристика трёх ключевых инновационных направлений представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительная таблица

Технология	Основные преимущества	Типичное изменение производительности (%)	Снижение незапланированных простоев (%)	Экономия топлива / энергии (%)	Ключевые барьеры	Ориентировочные капитальные затраты (CAPEX)

Автономные системы (AHS)	Повышение безопасности, более равномерная загрузка оборудования, круглосуточная работа без смен	10–30	5–20	0–10	Высокая стоимость внедрения, необходимость в надёжной связи, обучение и переквалификация персонала	Высокий (несколько миллионов долларов на пилотный проект или парк машин)
Предиктивное и цифровое обслуживание	Сокращение незапланированных простоев, более эффективное планирование ремонтов	5–15	15–30	0–5	Требования к качеству данных, интеграция с ERP и системами управления флотом, стартовые вложения	Средний (ПО + датчики)
Электрификация (аккумуляторные машины, троллейбусы, гибриды)	Снижение расхода дизельного топлива и локальных выбросов, меньше шума на площадке	0–10	5–15	10–20	Инфраструктура зарядки и энергоснабжения, большой вес батарей, высокая стоимость техники	Высокий (инфраструктура + оборудование)

В кейсе Resolute (Syama) автоматизация привела к немедленному снижению себестоимости производства примерно на 15% при начальных капиталовложениях порядка десятков миллионов долларов [13].

Краткая сводка по отдельным кейсам производителей и отчётным эффектам приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Разборы кейсов

Производитель / Кейс	Ключевые факты / модели	Отчетный эффект (примерно)	Источник (в тексте статьи)
Komatsu	>750 автономных самосвалов; >10 млрд метрических тонн перевезено; milestone 2024–2025	Рост эффективности 10–30%	komatsu (2024–2025) и обзоры
Caterpillar	Запуск автономного Cat® 777 (Luck Stone Quarry); MineStar решения	Снижение холостых пробегов и простоев (вариабельно)	investors.caterpillar.com (2024)

BELAZ	Батарейные и гибридные модели (BelAZ-7558E, BelAZ-7513M); пилотные испытания	Снижение расходов на топливо до ~20% (зависит от источника энергии)	belaz.by / mybelaz (2024–2025)
Resolute (Syama)	Кейс автоматизации: снижение себестоимости ≈15% (IISD / кейс-стади)	Снижение себестоимости ≈15%	IISD / кейс (2019) и обзор

Несмотря на высокую эффективность, внедрение подобных технологий сопровождается рядом проблем и барьеров. Среди ключевых можно выделить значительные капитальные затраты — переход к автономному и электрическому парку требует вложений в технику и инфраструктуру (зарядные станции, частные сети связи, центры управления). Ограничения накладывает и инфраструктура: аккумуляторные и электрические решения зависят от доступности электропитания и быстрой зарядки; trolley-assist требует прокладки контактной сети [4, 14].

Существенным остаётся и человеческий фактор — необходима подготовка и переквалификация персонала, а также изменение процедур технического обслуживания и обеспечения безопасности. Важную роль играют регуляторные требования: адаптация технологий к местным нормам безопасности и экологии может потребовать времени и дополнительных затрат. Наконец, экономическая неопределённость связана с зависимостью сроков окупаемости от стоимости топлива, тарифов на электроэнергию и масштаба проекта [1].

Обсуждение

Сопоставление технологий показывает, что наибольший синергетический эффект достигается при комбинированном внедрении: автономизация + цифровая аналитика + частичная или полная электрификация. Автономные системы повышают стабильность и безопасность операций, цифровые платформы уменьшают незапланированные простои, а электрификация снижает переменные энергетические расходы и экологический след. В то же время полная трансформация возможна не для всех карьеров: наиболее подходящие объекты — крупные горнодобывающие предприятия с устойчивыми транспортными профилями и доступом к энергетической инфраструктуре [4, 11].

Рекомендации для внедрения

1. Пилотирование — начать с небольших пилотных проектов (автономные «кольца», trolley-assist на ключевых подъёмах, пилотные батарейные грузовики).

2. Инфраструктурное планирование — заранее проектировать зарядную сеть и коммуникации (включая частную 5G/радиосети) [4].

3. Модернизация ТО — внедрять предиктивное обслуживание и обучать персонал новым процедурам.

4. Оценка окупаемости — моделировать операционные расходы и сценарии цен на энергоносители для обоснования инвестиций.

5. Комплексный подход — сочетать технологии (техника + софт + организация), а не поштучные решения.

Выводы

Современные инновации (автономизация, электрификация, цифровая аналитика) уже доказали свою применимость и дают измеримый эффект: повышение производительности, снижение простоев, улучшение безопасности и потенциал для снижения углеродного следа. Однако успешное масштабирование требует значительных инвестиций, развития инфраструктуры и адаптации организационных процессов. При стратегическом и поэтапном внедрении комбинация указанных технологий способна обеспечить устойчивое улучшение эффективности карьерного автомобильного транспорта [4-5, 9, 13].

Список литературы

1. Bird D. Autonomous Mining Equipment: May 2019 Report // RF Cambrian. URL: <https://www.rfcambrian.com/wp-content/uploads/2019/04/RFCA-NTI-Report-2-Autonomous-Mining-Equipment-May-2019.pdf>.
2. Хазин Марк Леонтьевич (2020). Роботизированные Карьерные Самосвалы. Известия Уральского государственного горного университета, (3 (59)), 123-130.
3. Клебанов Д. А., Макеев М. А., Сиземов Д. Н. Применение автономной и дистанционно-управляемой техники на открытых горных работах // Горная промышленность. – 2020. – №. 6. – С. 14-18.
4. Komatsu achieves major autonomous milestones. URL: <https://www.komatsu.com/en-us/newsroom/2024/komatsu-achieves-major-autonomous-milestones>
5. Caterpillar Paves the Way for Future Technology Advancements with Launch of Autonomous Cat® 777 Off-Highway Truck at Luck Stone Quarry. URL: <https://investors.caterpillar.com/news/news-details/2024/Caterpillar-Paves-the-Way-for-Future-Technology-Advancements-with-Launch-of-Autonomous-Cat-777-Off-Highway-Truck-at-Luck-Stone-Quarry/default.aspx>
6. Шишкина П. А. Аналитическое исследование гибридных автомобилей с точки зрения экологии и эксплуатации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – №. 12. – С. 256-258
7. Гусаков С. В., Марков В. А., Афанасьева И. В. Улучшение эксплуатационных показателей транспортных средств при использовании гибридных силовых установок // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. – №. 2. – С. 32-41.
8. Мировая премьера БЕЛАЗ - уникальный гибридный карьерный самосвал БЕЛАЗ-7513М. URL: <https://www.mybelaz.ru/info/news/mirovaya-premera-belaz-unikalnyy-gibridnyy-karernyy-samosval-belaz-7513m/>.
9. Electrification and environmental friendliness to a new level: BELAZ presented two new dump trucks with an emphasis on green technologies. URL: <https://belaz.by/en/press-centre/electrification-and-environmental-friendliness-to-a-new-level-belaz-presented-two-new-dump-trucks-wi/>.
10. Khazin M. L. et al. Directions of career transport development // Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering. – 2021. – Т. 21. – №. 3. – С. 144-150. The Australian
11. Fortescue signs US\$2.8 billion green equipment partnership with Liebherr for zero emission mining solutions. URL: <https://www.fortescue.com/en/articles/fortescue-signs-us-28-billion-green-equipment-partnership-with-liebherr>
12. Making the most of autonomous mining system - Polymathian. URL: <https://polymathian.com/en/news-media/blogs/making-the-most-of-autonomous-mining-system/>
13. Ramdoo I. Automation and water-saving technologies / I. Ramdoo. – Winnipeg: International Institute for Sustainable Development (IISD), 2019. – URL: <https://www.iisd.org/system/files/publications/igf-case-study-water-techologies.pdf#page=11.31>

14. Serious work front: 130-tone hybrid-truck dump sent for the pilot testing in Sitnitsa.
URL: <https://belaz.by/en/press-centre/serious-work-front-130-tone-hybrid-truck-dump-sent-for-the-pilot-testing-in-sitnitsa/>.

Сведения об авторах (на трех языках):

Умарова Гүлжамал Бақтиярқызы – техника ғылымдарының кандидаты, «Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институты» АҚ, Астана, Қазақстан, g.umarova@qazjolgzi.kz

Умарова Гулжамал Бахтияровна – кандидат технических наук, АО «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт, Астана, Казахстан, g.umarova@qazjolgzi.kz

Umarova Gulzhamal Bakhtiyarovna – Candidate of Technical Sciences, JSC «Kazakhstan Road Research Institute», Astana, Kazakhstan, g.umarova@qazjolgzi.kz

Мырзабеков Нұрлыбек Мырзабекұлы – магистр, докторант «Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ, Астана, Қазақстан, nurlybekmyrzabekov@mail.ru

Мырзабеков Нурлыбек Мырзабекович – магистр, докторант НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, nurlybekmyrzabekov@mail.ru

Myrzabekov Nurlybek Myrzabekuly – Master's degree, doctoral student, NJSC «L.N. Gumilyov Eurasian National University», Astana, Kazakhstan, nurlybekmyrzabekov@mail.ru

Бақытжанов Нұржан Рахымжанұлы - магистр, «Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институты» АҚ, Астана, Қазақстан, nurzhan_19-92@mail.ru

Бақытжанов Нұржан Рахымжанұлы – магистр, АО «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт, Астана, Казахстан, nurzhan_19-92@mail.ru

Bakhytzhanov Nurzhan Rakhymzhanuly – Master's degree, JSC «Kazakhstan Road Research Institute», Astana, Kazakhstan, nurzhan_19-92@mail.ru

Кабылдина Сауле Сағытаевна – инженер-маман, «Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институты» АҚ, Астана, Қазақстан, s.kabyldina@qazjolgzi.kz

Кабылдина Сауле Сагитаевна – инженер-специалист, АО «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт, Астана, Казахстан, s.kabyldina@qazjolgzi.kz

Kabildina Saule Sagitaevna – specialist engineer, JSC «Kazakhstan Road Research Institute», Astana, Kazakhstan, s.kabyldina@qazjolgzi.kz

Вклад авторов:

Умарова Г.Б. - концепция, методология, ресурсы;

Мырзабеков Н.М.- концепция, методология, ресурсы, сбор данных, анализ;

Бақытжанов Н.Р. - ресурсы, сбор данных, подготовка текста, редактирование;

Кабылдина С.С. - сбор данных, анализ, подготовка текста, редактирование.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Использование искусственного интеллекта (ИИ): ИИ использовался при поиске дополнительной информации, а также для проверки грамматических и стилистических ошибок.

КАРЬЕРЛІК АВТОКӨЛІК ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУДЫҢ ИННОВАЦИЯЛЫҚ ТӘСІЛДЕРІНЕ ШОЛУ

**Г.Б. Умарова¹, Н.М. Мырзабеков², Н.Р. Бақытжанов^{1*},
С.С. Кабылдина¹**

¹«Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институты» АҚ, Астана, Қазақстан;

²«Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» Коммерциялық акционерлік қоғам, Астана, Қазақстан;

* Корреспондент автор: nurzhan_19-92@mail.ru

Аннотация. Шолуда карьерлік автомобиль көлігінің тиімділігін арттыруға бағытталған заманауи инновациялық шешімдер қарастырылды. Автопаркті автоматтандыру мен автономизациялауға, электр және гибриді жетектерді енгізуге, сондай-ақ мониторинг пен талдаудың цифрлық технологияларын (IoT, болжамды техникалық қызмет көрсету) пайдалануға ерекше назар аударылады. Жеке бөлім кәсіпорындардың жұмысын жан-жақты жақсартуға мүмкіндік беретін ұйымдастырушылық және басқарушылық тәсілдер мен экологиялық бастамаларға арналған. Ашық көздер негізінде халықаралық және отандық тәжірибеден алынған мысалдарды қамтитын практикалық жағдайларға талдау жүргізілді, онда технологиялардың өнімділікке, шығындарға және қауіпсіздік деңгейіне әсерін сандық бағалау көрсетілді. Инновацияларды қолданудың техникалық және әлеуметтік-экономикалық аспектілері қарастырылады. Зерттеудің негізгі қорытындылары жаңа техникалық шешімдерді цифрлық басқару құралдарымен синергетикалық біріктіру арқылы оң нәтижеге қол жеткізілетінін көрсетеді. Сонымен қатар, енгізудің белгілі бір кедергілері де бар, олар: аса күрделі шығындар, инфрақұрылымды дамыту қажеттілігі және білікті кадрларды даярлау.

Түйінді сөздер: карьерлік автокөлік; автономизация; болжамды техникалық қызмет көрсету; электрлендіру; пайдалану тиімділігі.

AN OVERVIEW OF INNOVATIVE APPROACHES TO IMPROVING THE EFFICIENCY OF CAREER VEHICLES

G.B. Umarova¹, N.B. Myrzabekov², N.R. Bakytzhanov^{1*},
S.S. Kabyldina¹

¹JSC «Kazakhstan Road Research Institute», Astana, Kazakhstan;

² NJSC «L.N. Gumilyov Eurasian National University», Astana, Kazakhstan

*Correspondent author: nurzhan_19-92@mail.ru

Annotation. The review examines modern innovative solutions aimed at improving the efficiency of career motor transport. Special attention is paid to the automation and autonomy of the fleet, the introduction of electric and hybrid drives, as well as the use of digital monitoring and analytics technologies (IoT, predictive maintenance). A separate section is devoted to organizational and managerial approaches and environmental initiatives that make it possible to comprehensively improve the work of enterprises. Based on open sources, an analysis of practical cases has been conducted, including examples from international and domestic experience, which demonstrate quantitative assessments of the impact of technology on productivity, costs and security. Both technical and socio-economic aspects of the application of innovations are considered. The key findings of the study show that the greatest positive effect is achieved with a synergistic combination of new technical solutions with digital management tools. At the same time, there are still certain barriers to implementation: high capital costs, the need for infrastructure development and the training of qualified personnel.

Keywords: Career vehicles; autonomization; predictive maintenance; electrification; operational efficiency.



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).