Оригинальная статья

Original Paper

УДК 622.684 © А.Ю. Воронов✉, В.В. Аксенов, Г.Д. Буялич, Л.Е. Маметьев, Д.А. Пашков, 2025

ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия
✉ e-mail: voronovayu@kuzstu.ru

UDC 622.684 © A.Yu. Voronov✉, V.V. Aksenov, G.D. Buyalich, L.E. Mametyev, D.A. Pashkov, 2025

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation
✉ e-mail: voronovayu@kuzstu.ru

Влияние интеллектуальных систем управления на рентабельность открытых горных работ

The impact of intelligent fleet management systems on the profitability of open-pit mining

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-12-97-103

В статье определяется влияние интеллектуальных систем управления на рентабельность открытых горных работ. Исследуются схема цепочки поставок, а затем схема цепочки создания стоимости в горнодобывающей промышленности, чтобы изучить влияние технологических достижений на системы управления и, как следствие, на прибыль. Представленная диаграмма цепочки создания стоимости выгодна для наглядного экономического обоснования таких интеллектуальных систем для акционеров и управленцев. Кроме того, она может указать новые направления исследований для ученых-горняков. Также представлена обобщенная методология исследований при изучении возможности внедрения интеллектуальных систем. Сформулирована обобщенная методология, которая представляется необходимой для соблюдения при исследовании возможности использования интеллектуальных систем управления добычей полезных ископаемых.

Ключевые слова: *открытые горные работы, система управления, искусственный интеллект, цепочка поставок, цепочка создания стоимости*

Для цитирования: Влияние интеллектуальных систем управления на рентабельность открытых горных работ / А.Ю. Воронов, В.В. Аксенов, Г.Д. Буялич и др. // Уголь. 2025;(12): 97-103. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-12-97-103.

Abstract

The article defines the impact of intelligent control systems on the profitability of open-pit mining operations. A supply chain diagram is investigated, followed by a value chain diagram in the mining industry, in order to examine the impact of technological advances on management systems and, as a result, on profits. The presented diagram of the value chain is beneficial for the visual economic justification of such intelligent systems for shareholders and managers. In addition, it can point out new research directions for mining scientists. A generalized research methodology is also

ВОРОНОВ А.Ю.
Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры ЭА, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия, e-mail: voronovayu@kuzstu.ru

АКСЕНОВ В.В.
Доктор техн. наук, главный научный сотрудник научного центра «Цифровые технологии», ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия, e-mail: 55vva42@mail.ru

** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению от 30.09.2022 г. №075-15-2022-1198 с ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» Комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения» (КНТП «Чистый уголь – Зеленый Кузбасс») утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 мая 2022 г. № 1144-р в рамках реализации мероприятия «Разработка и создание беспилотного карьерного самосвала челночного типа грузоподъемностью 220 тонн» в части выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.*

БУЯЛИЧ Г.Д.
Доктор техн. наук, Профессор, профессор кафедры ГМиК, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия, e-mail: gdb@kuzstu.ru

МАМЕТЬЕВ Л.Е.
Доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры ГМиК, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия, e-mail: mle.gmk@kuzstu.ru

ПАШКОВ Д.А.
Канд. техн. наук, старший научный сотрудник научного центра «Цифровые технологии», ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный Технический университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия, e-mail: pashkovda@kuzstu.ru

presented for studying the possibility of implementing intelligent systems. A generalized methodology has been formulated, which seems to be necessary for compliance with the study of the possibility of using intelligent mining management systems.

Key words
Open-pit mining; fleet management system; artificial intelligence; supply chain; value chain.

Acknowledgements
The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the agreement dated 30.09.2022 № 075-15-2022-1198 with the Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev's "Comprehensive scientific and technical program for a full innovation cycle "Development and implementation of a set of technologies in the fields of exploration and extraction of solid minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new products of deep processing from coal raw materials while consistently reducing the environmental impact and risks to the life of the population" (KNTP "Clean coal – Green Kuzbass") approved by the decree of the Government of the Russian Federation dated May 11, 2022. No. 1144-r within the framework of the event "Development and creation of an unmanned shuttle-type mining dump truck with a lifting capacity of 220 tons" in terms of carrying out research and development work.

For citation
Voronov A.Yu., Aksenov V.V., Buyalich G.D., Mametyev L.E., Pashkov D.A. The impact of intelligent fleet management systems on the profitability of open-pit mining. *Ugol'*. 2025;(12):97-103. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-12-97-103.

ВВЕДЕНИЕ

С целью необходимости дальнейших усилий для более глубокого признания интеллектуальных систем управления (СУ) [1, 2, 3, 4, 5] можно рассмотреть две основные точки зрения: экономическую или экологическую. Здесь основное внимание уделяется первой с помощью анализа цепочки создания стоимости (ЦСС). То есть суть внедрения интеллекта в СУ исследуется вдоль ЦСС эксплуатации, чтобы понять, как этот переход способствует повышению прибыли.

ЦСС – концептуальное изображение последовательных шагов, предпринимаемых организацией для разработки, производства и распространения своих предложений среди клиентов. Анализ ЦСС – это инструмент, используемый для определения областей, которые можно усовершенствовать для повышения эффективности и конкурентоспособности. Этот аналитический подход охватывает как основные виды деятельности, напрямую вовлеченные в создание и доставку продукта или услуги, так и вспомогательные виды деятельности, облегчающие основные. Следует отличать цепочку поставок (ЦП) от ЦСС: первая описывает поток материалов от поставщиков к потребителям для снижения затрат и повышения эффективности, а вторая описывает поток спроса от потребителей с целью инициирования инноваций в разработке и маркетинге продукции [6, 7, 8, 9].

Анализ ЦСС дает преимущество оценки погрузочно-транспортных работ как основного вида деятельности по отношению к технологическим достижениям как вспомогательной деятельности для выявления возможностей до-

бавления стоимости за счет повышения эффективности и снижения затрат. Здесь деятельностью по добавлению стоимости является включение технологий «Майнинга 4.0» в основной вид деятельности по переработке горной массы на карьерах. Рассмотрение перспективы ЦСС в отношении удобства использования интеллектуальных СУ имеет первостепенное значение в том смысле, что это не только служит доказательством концепции для производственников-ретроградов, но и намечает потенциальные направления исследований для добавления большей стоимости и, следовательно, получения более высокой прибыли для предприятия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Первоначально созданная М. Портером в 1985 г. концепция ЦСС представляет собой набор видов деятельности, взаимодействующих внутри компании для создания ценности для потребителей (или прибыли для компании) с целью получения преимуществ перед конкурентами [10, 11, 12, 13]. Здесь исследуются взаимодействие между технологическими достижениями и горнодобывающими СУ, а также влияние их синергии на размер прибыли. Но до этого проводится анализ ЦП, чтобы получить нисходящий взгляд на концепцию.

ЦЕПОЧКА ПОСТАВОК ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Находясь на оперативном уровне иерархии планирования горных работ, СУ демонстрируют тесные отношения с логистикой, а затем и с управлением ЦП. Типичная ЦП состоит из пяти элементов, а именно: поставщиков, производителей, дистрибьюторов, розничных торговцев и потребителей. На *рис. 1* изображена целостная схема ЦП горнодобывающей промышленности, чтобы лучше сопоставить функции СУ вдоль этой линии.

Собственно говоря, каждую из этих пяти цепочек можно считать ЦСС как таковой. ЦСС разведки и эксплуатации служит базовым поставщиком для всей сети, учитывая все виды деятельности, необходимые для доставки сырья на обогатительные фабрики, начиная от разведки потенциальных запасов и заканчивая буровзрывными работами, погрузочно-транспортными работами, разгрузкой и внешней логистикой. Следовательно, СУ должна эффективно справляться с погрузочно-транспортными работами и перегрузкой горной массы за счет отправки эффективных команд на диспетчеризацию и разгрузку значительному количеству погрузочных и транспортных единиц. СУ для горнодобывающей промышленности также выполняет и другие задачи, включая ТО, управление топливом и обеспечение необходимого питания для первичных дробильных установок (если они есть). Однако цель, преследуемая этой диаграммой, – позиционирование СУ в ЦП горнодобывающей промышленности, а не перечисление всех задач управления парком.

Можно было бы выделить отдельную ЦСС для предварительных этапов добычи, таких как разведка; тем не менее, разведка объединена с эксплуатацией, чтобы обеспечить наличие новых минеральных запасов для непрерывного потока сырья. После транспортировки и размещения (складирования) добытое сырье подвергается различной переработке в зависимости от свойств его основных минералов на обогатительной фабрике для получения концентрата перед хранением и обработкой в следующей ЦСС, называемой плавильным или аффинажным заводом, где минералы извлекаются из концентрата, а затем укладываются в виде слитков. После этого по распределительной цепочке происходит доставка грузов покупателям по земле, железной дороге или морю. После складирования на заводе конечного потребителя очищенные минералы легко преобразуются в различные товары, что обозначает конец этой длинной ЦП горнодобывающей промышленности. Последняя ЦСС также может сформировать другую ЦП с нижестоящими отраслями.

Рис. 1. Комплексная цепочка поставок горнодобывающей промышленности, интегрированная с системой управления парком техники [14]

Fig. 1. Integrated mining supply chain with fleet management system [14]

Как упоминалось ранее, типичная ЦП включает в себя еще одну цепочку под названием «розничная торговля», которая очень распространена в ЦП продуктов питания и бакалеи. Аналогично розничные торговцы могут существовать и в сети добычи полезных ископаемых, следуя за каждой ЦСС, иногда выступая в качестве посредников, особенно в определенных политических, экономических, юридических, технических или логистических ситуациях. Как правило, каждое предприятие стремится продавать свой товар напрямую конечному потребителю, если для этого нет препятствий.

ЦП горнодобывающей промышленности состоит из пяти отдельных фаз – разведка/эксплуатация, переработка, выплавка, дистрибуция и потребление – и претерпевает значительную эволюцию за счет внедрения интеллектуальных СУ. Фаза разведки и эксплуатации, как первичная стадия выявления и извлечения сырья из недр, получает существенные улучшения от этих систем. Интегрированные СУ в этой фазе предоставляют мониторинг в реальном времени и принятие решений на основе текущих данных, оптимизируя маршруты ТС и совершенствуя процессы идентификации и извлечения ресурсов. Например, с помощью технологии GPS эти системы точно отслеживают разведочные ТС и оборудование на участках добычи, гарантируя, что будут выбраны наиболее эффективные пути для достижения определенных богатых минералами районов. Телематические системы, интегрированные в ТС во время эксплуатации, обеспечивают мониторинг в реальном времени производительности оборудования, расхода топлива и технического состояния ТС, что позволяет на ранней стадии обнаруживать проблемы и проводить ТО, тем самым продлевая срок службы оборудования. Прогнозная аналитика, встроенная в эти системы, прогнозирует потребности в ТО, сокращая простои техники за счет ее своевременного ремонта или замены. Возможности обмена данными и коммуникации в режиме реального времени, предоставляемые системами, способствуют оперативному принятию решений, что приводит к более эффективному распределению ресурсов, стратегическому планированию, повышению производительности и снижению эксплуатационных расходов при разведке и разработке полезных ископаемых.

АНАЛИЗ ЦЕПОЧКИ СОЗДАНИЯ СТОИМОСТИ НА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ

Анализ ЦСС обеспечивает систематический подход для выявления видов деятельности, добавляющих стоимость, и, следовательно, повышения рентабельности организации. Подход М. Портера делит девять видов деятельности на две категории: основные (внутренняя логистика, производство, внешняя логистика, маркетинг/продажи и сервис) и вспомогательные (закупки, технологическое развитие, управление персоналом и инфраструктура фирмы) [15].

Основные виды деятельности напрямую связаны с физическим созданием и реализацией продукции, тогда как другая категория координирует основные виды деятельности для бесперебойного их функционирования. Если конкретно рассматривать основные виды деятельности, внутренняя логистика охватывает прием, хранение, управление запасами и проверку входов. Производство связано со всеми усилиями по преобразованию сырья в новые продукты (изготовление, сборка, упаковка, тестирование, ТО оборудования, контроль качества и т.д.). Связанные с внешней логистикой виды деятельности – обработка заказов, складирование и отгрузка. Основные задачи, возложенные на маркетинг и продажи, включают в себя рекламу, продвижение, каналы распределения и ценообразование. Наконец, послепродажный сервис обеспечивает огромное конкурентное преимущество, предоставляя различные консалтинговые услуги, ТО, поставку деталей, установку, обучение и гарантийные льготы.

В верхней части диаграммы ЦСС находятся вспомогательные виды деятельности, одним из которых являются закупки, относящиеся к функции ведения переговоров о лучших ценах на поставку сырья, зданий, оборудования, канцелярских принадлежностей и расходных материалов. Технологическое развитие охватывает все основные виды деятельности и даже каждую вспомогательную деятельность, предлагая оцифровку, телекоммуникации, автоматизацию, ИИ, интеллектуальный анализ данных, исследовательские проекты и т.д. Управление персоналом является еще одной ключевой областью, которая оказывает огромное влияние на эффективность компании, состоящей из набора и обучения находчивых сотрудников. Финансовые, юридические, стратегические, плановые и бухгалтерские вопросы, а также все основные и вспомогательные виды деятельности находятся под эгидой инфраструктуры фирмы. Все виды деятельности взаимосвязаны друг с другом, что подразумевает, что изменение одного из них приводит к изменению другого в положительную или отрицательную сторону. Чем более оптимизированными и скоординированными становятся виды деятельности, тем больше будут получены прибыль и конкурентное преимущество. Совместное влияние развития технологий и СУ на эффективность и прибыльность горнодобывающего предприятия по всей ЦСС его эксплуатации представлено на *рис. 2* и описано в *таблице*.

Производя сырье для отраслей и перерабатывающих предприятий, сама добыча полезных ископаемых также имеет некоторые входные элементы и услуги, известные как внутренняя логистика, включая топливо, генераторы, запасные части, техников, взрывчатые вещества и рутинные поручения. Что касается второго основного вида деятельности, типичные горнодобывающие операции включают в себя подготовку новых уступов и горизонтов, выполнение БВР, погрузку, транспортировку, разгрузку и подачу сырья на дробилки и обогатительные фабрики. Упорядоченное управление большим количеством ТС вместе с огромными объемами грузов требует последовательной непрерывной работы СУ для повышения производительности. Таким образом, СУ считается краеугольным камнем погрузочно-транспортного этапа эксплуатации.

Внешняя логистика занимается контролем и мониторингом мест разгрузки с точки зрения тоннажа и сорт-

Описание различных видов деятельности в цепочке создания стоимости [14]

Description of the different activities in the value chain [14]

Тип	Деятельность	Описание
Вспомогательная деятельность	Инфраструктура фирмы	Финансы, бухгалтерский учет, юридические разрешения, здания, оборудование
	Управление персоналом	Подбор персонала, обучение, развитие карьеры, дополнительные льготы, удержание, компенсация, оценка безопасности и охраны труда
	Технологическое развитие	Средства «Майнинг 4.0» (сбор данных, роботы, имитационное моделирование, системная интеграция, Интернет вещей, кибербезопасность, облачные вычисления, дополненная реальность, ИИ, цифровые двойники, киберфизические системы, квантовые вычисления, 3D-печать, исследование и развитие, беспилотные ТС, дроны и т.д.
	Закупки	Управление поставками, переговоры и субподряды на оборудование и услуги
Основная деятельность	Внутренняя логистика	Расходные материалы (топливо, электричество), запасные части, взрывчатка, поручения
	Производство	Разработка новых забоев, буровзрывные работы, погрузка, транспортировка, складирование, загрузка дробилок
	Внешняя логистика	Управление отвалами руды, контроль качества, шихтовка, обработка заказов, выставление счетов и отгрузка
	Маркетинг и продажи	Мультимедийная реклама, внутренние и международные выставки, брендинг, анализ продаж и исследования рынка
	Сервис	Послепродажное обслуживание в случае колебаний цен, консультации

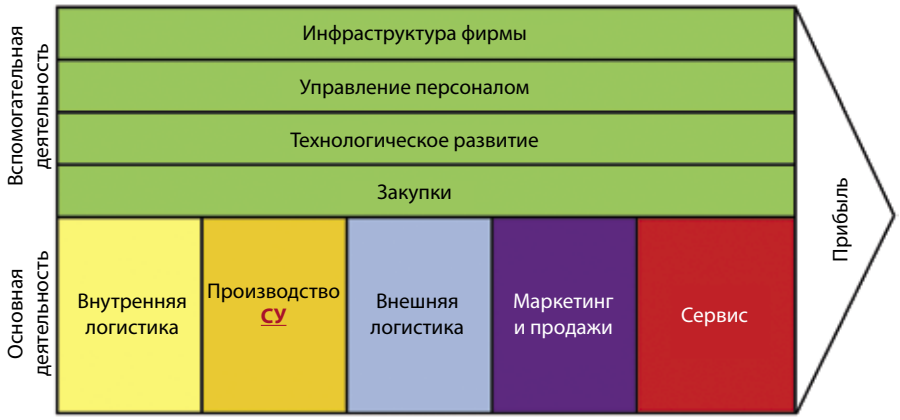

Рис. 2. Совместное влияние технологии и системы управления на прибыльность в цепочке создания стоимости эксплуатации [14]

Fig. 2. The combined impact of technology and fleet management system on profitability in the operational value chain [14]

ности, методами смешивания на специальной основе и, в конечном итоге, отправкой дробленого или недробленого ископаемого. В маркетинговом разделе обычно следуют реклама, посещение ярмарок для продвижения продукции, брендинг и анализ стратегии продаж. Будучи неоднородными, полезные ископаемые иногда подвержены волатильности сортов, что создает проблемы в последующей ЦСС. Последний основной вид деятельности справляется с такими обстоятельствами для повышения удовлетворенности клиентов.

Вспомогательные виды деятельности были в целом и в достаточной степени объяснены ранее. Если рассматривать конкретно технологическое развитие, можно представить, как быстрый темп научных достижений радикально меняет традиционную концепцию. Четвертая промышленная революция, начатая в 2015 г., основана на девяти основных столпах, а именно больших данных и аналитике, роботах, моделировании, системной интеграции, Интернете вещей, кибербезопасности, облачных вычислениях, аддитивном производстве и дополненной реальности. Список можно продолжить с помощью дополнительных факторов, особенно с учетом того, что в последнее десятилетие на первый план выходят ИИ и цифровые двойники. «Майнинг 4.0» пытается повысить прибыльность за счет использования этих прорывных технологий [8, 9]. Понимание внутренних связей между видами деятельности в ЦСС имеет важное значение для более глубокой оценки диаграммы. Вспомогательные виды деятельности распространяются на все основные, что указывает на то, что действия на нижнем уровне напрямую зависят от изменений на верхнем уровне и наоборот. Таким образом, взаимная коммуникация различима между этими двумя типами деятельности, так что координация и оптимизация реализуются по всей ЦСС.

Исследование (*см. рис. 2*) подчеркивает тот факт, что технологический прогресс в СУ горнодобывающими операциями приводит, например, к экономии топлива во внутренней логистике, и это принесет выгоду компании (инфраструктуре фирмы) за счет уменьшения фонда закупки топлива. В другом случае модернизация СУ до самых современных технологий увеличивает объемы добычи, что влечет за собой усилия маркетингового подразделения по привлечению большего количества клиентов. С этой целью отдел кадров ощущает необхо-

димость нанимать более ловких маркетологов. Преимущества интеллектуальной СУ сохраняются, когда графики ТО парка точно запланированы, что приводит к уменьшению потребности в запасных частях и, следовательно, к уменьшению усилий по переговорам, предпринимаемых отделом закупок. Все эти улучшения продвигают горнодобывающее предприятие к более высокой норме прибыли, подчеркивая тот факт, что СУ, особенно интеллектуальная, может укрепить ЦСС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были рассмотрены интеллектуальные СУ с точки зрения ЦСС, чтобы пролить свет на многосторонние связи в треугольнике технологии, транспортировки и прибыли. Чем больше задействовано технологий, тем более эффективные СУ будут разработаны, и тем выше прибыль, как предполагается, будет получена от оптимизации обслуживания, диспетчеризации, планирования производства, потребления топлива и в целом всего предприятия. Можно сформулировать обобщенную методологию, которая представляется необходимой для соблюдения при исследовании возможности использования интеллектуальных систем управления добычей полезных ископаемых. Эта методология состоит из следующих шагов:

Шаг 1. Выявление проблем и определение области применения:

– определение конкретных проблем и неэффективностей в процессах добычи;

– определение областей, в которых интеллектуальные СУ могут потенциально повысить эффективность, безопасность и производительность.

Шаг 2. Обзор литературы и оценка технологий:

– проведение обширного обзора литературы, чтобы понять существующие методологии и технологии, используемые в горнодобывающей промышленности и СУ;

– оценка различных интеллектуальных систем, таких как GPS-отслеживание, телематика, прогнозная аналитика и Интернет вещей, чтобы определить их применимость в процессах добычи полезных ископаемых.

Шаг 3. Сбор данных и интеграция системы:

– сбор соответствующих данных с горнодобывающего комплекса – о производительности оборудования, эксплуатационных и исторических данных, геоинформации;

– интеграция СУ с существующей инфраструктурой, обеспечение совместимости и бесперебойного потока данных.

Шаг 4. Внедрение и тестирование системы:

– внедрение выбранных интеллектуальных систем на этапе добычи;

– проведение комплексного тестирования и проверки для оценки функциональности и производительности этих систем в ходе горных работ в реальном времени.

Шаг 5. Оценка и анализ производительности:

– мониторинг и оценка показателей производительности, включая время безотказной работы оборудования, топливную эффективность и графики ТО;

– анализ собранных данных для количественной оценки влияния интеллектуальных систем на производительность, экономическую эффективность и протоколы безопасности.

Шаг 6. Включение и оптимизация обратной связи:

– сбор отзывов от заинтересованных сторон, операторов и пользователей относительно эффективности и удобства использования внедренных интеллектуальных систем;

– включение обратной связи для доработки и оптимизации систем для лучшей интеграции и эксплуатационной эффективности.

Шаг 7. Документирование и отчетность:

– документирование всего процесса исследования, включая методологии, выводы, возникшие проблемы и рекомендации по будущим внедрениям;

– подготовка подробного отчета с описанием результатов, идей и потенциальных областей для дальнейших исследований с использованием интеллектуальных систем в процессах добычи полезных ископаемых.

Диаграмма, представленная на *рис. 2*, наглядно отображает эти связи на графическом языке, упрощая процесс обоснования и объяснения для старомодных акционеров, сомневающихся в оснащении своих предприятий передовыми методами. Наличие таких просветительских исследований полезно не только в промышленном, но и в академическом плане, поскольку оно дает более широкий кругозор ученым и студентам-горнякам. Это способствует обогащению их знаний о ЦП горной промышленности, а также выявляет потенциальные возможности улучшения, которыми можно воспользоваться.

Подводя итог, можно сказать, что данное исследование доказывает глубокое влияние внедрения интеллекта в СУ на прибыль, что открывает возможность для более широкого внедрения технологий «Майнинга 4.0» как в мониторинг погрузочно-транспортного оборудования, так и в деятельность вдоль ЦСС эксплуатации. Обзор литературы показывает, что в работах по горному делу по-прежнему отсутствует целостная многоцелевая интеллектуальная СУ, что намечает план исследований по этой теме на годы вперед.

Список литературы • References

1. Разработка структуры системы управления беспилотным карьерным самосвалом / Д.М. Дубинкин, В.Ю. Садовец, И.С. Сыркин и др. // Горное оборудование и электромеханика. 2020. № 6(152). С. 25-30. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-6-25-30.
   Dubinkin D.M., Sadovets V.Yu., Syrkin I.S., Chicherin I.V. Development of the structure of the control system for an unmanned mining dump truck. *Mining equipment and electromechanics*. 2020;6(152)25-30. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-6-25-30. (In Russ.).
2. Мониторинг динамического состояния автономных тяжелых платформ на карьерных маршрутах горнорудных предприятий / С.Г. Костюк, И.В. Чичерин, Б.А. Федосенков и др. // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. Т. 12. № 4. С. 600-608. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-600-608.
   Kostyuk S.G., Chicherin I.V., Fedosenkov B.A., Dubinkin D.M. Monitoring the dynamic state of autonomous heavy platforms on mining routes of mining enterprises. *Sustainable development of mountainous territories*. 2020;12(4):600-608. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-600-608. (In Russ.).

3. Современное состояние техники и технологий в области карьерных самосвалов с накопителями энергии / Д.М. Дубинкин, А.Б. Карташов, Г.А. Арутюнян и др. // Горное оборудование и электромеханика. 2020. № 6(152). С. 31-42. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-6-31-42.
   Dubinkin D.M., Kartashov A.B., Arutyunyan G.A., Buzunov N.V., Sorokin K.P., Yalyshev A.V. The current state of technology and technologies in the field of dump trucks with energy storage. *Mining equipment and electromechanics.* 2020;6(152):31-42. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-6-31-42. (In Russ.).
4. Дубинкин Д.М., Аксенов В.В., Пашков Д.А. Тенденции развития беспилотных карьерных самосвалов // Уголь. 2023. № 6. С. 72-79. DOI: 10.18796/0041– 5790-2023-6-72-79.
   Dubinkin D.M., Aksenov V.V., Pashkov D.A. Trends in the development of unmanned mining dump trucks. *Ugol'*. 2023;(6):72-79. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-6-72-79.
5. Воронов А.Ю., Сыркин И.С., Пашков Д.А. Интеллектуальные системы управления на открытых горных работах: состояние и перспективы // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 4(170). С. 169-183. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-4-169-183.
   Voronov A.Yu., Syrkin I.S., Pashkov D.A. Intelligent fleet management systems in open-pit mining: status and prospects. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2025;4(170):169-183. (In Russ.).
6. Syrkin I., Sadovets V., Korshunova E. et al. Developing environmentally adapted simulators for autonomous mining dump trucks: a Multi-criteria approach to enhance sustainability and ecological safety. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science.* 2024;14(4):181-190. DOI: 10.31407/ijees14.422.
7. Дубинкин Д.М., Голофастова Н.Н., Сыркин И.С. Технико-экономическое обоснование разработки отечественного программного обеспечения управления автономным движением роботизированных карьерных самосвалов // Евразийское пространство: экономика, право, общество. 2023. № 9. С. 22-27.
   Dubinkin D.M., Golofastova N.N., Syrkin I.S. Feasibility study for the development of domestic software for controlling autonomous movement of robotic mining dump trucks. *Eurasian space: economics, law, society*. 2023;(9):22-27. (In Russ.).
8. Разработка критериев обеспечения совместной работы источников энергии для создания новых карьерных самосвалов / Н.В. Бузунов, Р.Д. Пирожков, А.Б. Карташов и др. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2020. № 6(142). С. 87-97. DOI: 10.26730/1999-4125-2020-6-87-97.
   Buzunov N.V., Pirozhkov R.D., Kartashov A.B., Dubinkin D.M. Development of criteria for ensuring the joint operation of energy sources for the creation of new mining dump trucks. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2020;6(142):87-97. DOI: 10.26730/1999-4125-2020-6-87-97. (In Russ.).
9. Dubinkin D., Sadovets V., Syrkin I., Chicherin I. Assessment of the Need to Create Control Sytem of Unmanned Dump Truck. E3S Web of Conferences: 18, Ekaterinburg, 02-11 april, 2020. Ekaterinburg, 2020. P. 03022. DOI: 10.1051/e3sconf/202017703022.
10. Bastos G.S., Souza L.E., Ramos F.T., Ribeiro C.H. A single-dependent agent approach for stochastic time-dependent truck dispatching in open-pit mining. In: Proceedings of the 2011 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), pp. 1057-1062.
11. Zhang C., Odonkor P., Zheng S., Khorasgani H., Serita S., Gupta C., Wang H. Dynamic dispatching for large-scale heterogeneous fleet via multi-agent deep reinforcement learning. In: Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), pp. 1436-1441.
12. De Carvalho J.P., Dimitrakopoulos R. Integrating production planning with truck-dispatching decisions through reinforcement learning while managing uncertainty. *Minerals.* 2021;(11).
13. Huo D., Sari Y.A., Kealey R., Zhang Q. Reinforcement learning-based fleet dispatching for greenhouse gas emission reduction in open-pit mining operations. *Resources, Conservation and Recycling.* 2023;(188):106664.
14. Hazrathosseini A., Afrapoli A.M. Maximizing mining operations: unlocking the crucial role of intelligent fleet management systems in surface mining's value chain. *Mining*. 2024;(4):7-20.
15. Porter M.E. Competitive strategy: creating and sustaining superior performance. The Free: New York, NY, USA, 1985.

Authors Information

Voronov A.Yu. – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the EA Department, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: voronovayu@kuzstu.ru

Aksenov V.V. – Doctor of Engineering Sciences, Chief Researcher of the Scientific Center "Digital Technologies", Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: 55vva42@mail.ru

Buyalich G.D. – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of the GMiK Department, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: gdb@kuzstu.ru

Mametyev L.E. – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of the GMiK Department, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: mle.gmk@kuzstu.ru

Pashkov D.A. – PhD (Engineering), Senior Researcher at the Scientific Center "Digital Technologies", T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: pashkovda@kuzstu.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 3.10.2025
Поступила после рецензирования: 15.11.2025
Принята к публикации: 28.11.2025

Paper info

Received October 3, 2025
Reviewed November 15, 2025
Accepted November 28, 2025