

УДК 656.135.5

ЦИФРОВИЗАЦИЯ ГРУЗОВЫХ АВТОПЕРЕВОЗОК: СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ И ИННОВАЦИИ

Данченков В.И., магистрант.гр.ГДм-1-24,2 курс

Научный руководитель: Уметалиев А.С. д.э.н., профессор

«Кыргызский государственный технический университет им.И.Раззакова»,

г. Бишкек, Республика Кыргызстан e-mail: pravo.bravo.8@gmail.com**Аннотация**

В современных условиях автомобильные грузовые перевозки становятся ключевым звеном в системе транспортной логистики, где наблюдается значительный рост эксплуатационных затрат. Исследование посвящено анализу эффективности внедрения интеллектуальных систем управления автопарком в контексте оптимизации транспортных потоков.

Ключевые слова: карьерные самосвалы, концепция Горное дело 4.0, транспортно-технологическая схема доставки руды, автомобильные грузовые перевозки

UDC 656.135.5

Digitalization of freight transportation: current trends and innovations

Danchenkov V.I., Master's Student, Group GDm-1-24, 2nd Year

Supervisor: Umetaliev A.S. Doctor of Economic Sciences, Professor

Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Republic of
Kyrgyzstan e-mail: pravo.bravo.8@gmail.com**Abstract**

In modern conditions, road freight transportation is becoming a key link in the transport logistics system, where there is a significant increase in operating costs. The study is devoted to analyzing the effectiveness of implementing intelligent fleet management systems in the context of optimizing transport flows.

Keywords: quarry dump trucks, Mining 4.0 concept, transport and technological scheme of ore delivery, road freight transportation / trucking

1. Введение

Современный этап развития горнодобывающей отрасли характеризуется существенным ростом эксплуатационных расходов. Анализ финансовых показателей 40 крупнейших горнодобывающих компаний мира за 2025 год демонстрирует тревожную тенденцию: при рекордной выручке, приближившейся к одному триллиону долларов, чистая норма прибыли

снизилась до 17%, что на треть меньше показателей предыдущего года. Основной причиной этого стал 30-процентный рост операционных затрат, достигших почти 600 миллиардов долларов, с прогнозируемым дальнейшим увеличением на 15%.

В этих условиях ключевым резервом для сохранения конкурентных преимуществ на интенсивном товарном рынке полезных ископаемых становится технологическая модернизация погрузочно-транспортных работ.

Транспортный комплекс является «кровеносной системой» горного предприятия и одновременно самой затратной частью открытых горных работ, охватывая полный спектр функций: от диспетчеризации до управления топливом, техническим обслуживанием и безопасностью. Традиционные логистические платформы, основы которых были заложены не менее 50 лет назад, перестают справляться с возросшими требованиями к масштабированию, автономности и способности работать в условиях высокой неопределенности.

Концепция «Горное дело 4.0» предлагает переход к новым бизнес-моделям на базе искусственного интеллекта (ИИ). Несмотря на успешные примеры внедрения автономных грузовиков, например, в Австралии, широкого распространения такие решения в мировой практике пока не получили.

Существует объективная потребность в обосновании экономической целесообразности данного перехода для консервативных акционеров и топ-менеджмента горнодобывающих предприятий. В связи с этим, целью настоящей работы является анализ влияния интеллектуальных транспортно-технологических схем доставки руды на норму прибыли горнодобывающего предприятия с использованием методологии цепочки создания ценности, что позволяет выявить скрытые возможности для повышения эффективности и снижения затрат.

2. Обзор литературы и постановка задачи

Теоретической базой для анализа транспортной логистики в горном деле служат понятия цепочки поставок (supply chain) и цепочки создания ценности (value chain). Цепочка поставок представляет собой структурированный производственный процесс, в котором сырье превращается в готовые товары и доставляется конечным потребителям, охватывая ряд взаимосвязанных операций: снабжение, производство, логистику и потребление. Управление цепочками поставок, термин, введенный Китом Оливером в 1982 году, направлено на эффективную координацию всех звеньев для создания быстрой, надежной и экономически безубыточной системы.

Важно отличать цепочку поставок от цепочки создания ценности: первая фокусируется на потоке материалов от поставщиков к потребителям с целью снижения затрат, тогда как вторая посвящена потоку спроса от потребителей, чтобы инициировать инновации в разработке продуктов и маркетинге. Концепция цепочки создания ценности, разработанная Майклом Портером в

1985 году, представляет собой набор видов деятельности, взаимодействующих внутри компании для создания ценности для потребителей и получения конкурентного преимущества.

Эволюция управления карьерным транспортом прошла путь от ручной диспетчеризации до автоматизированных систем.

Логистические системы горных предприятий первого поколения выполняли задачу отслеживания транспортных средств, второе поколение превратилось в комплекс инструментов планирования для выполнения сложных задач. В настоящее время идет процесс перехода к третьему поколению — автономным киберфизическим системам, имеющим в своей архитектуре цифровых двойников и блоки принятия решений на базе искусственного интеллекта.

Традиционные методы оптимизации, включая теорию массового обслуживания и линейное программирование (LP), имеют существенные ограничения. Теория массового обслуживания ограничена из-за предположения о предсказуемости входных данных и узкой направленности на конкретные типы проблем. Модели на основе линейного программирования критикуются за необходимость определения допустимого диапазона для включения операционных ограничений, таких как коэффициент вскрыши и требуемое содержание полезного компонента. Смешанное целочисленное линейное программирование (MILP) лишь частично решает эту проблему.

Современные исследования смещаются в сторону алгоритмов машинного обучения (ML), которое использует три основные стратегии: обучение с учителем (прикрепленный программист), без учителя и обучение с подкреплением (RL). Именно подход на основе обучения с подкреплением, инициированный Бастосом[1] и др. и продолженный Чжаном[2], Димитракопулосом[4], Хо и др.[3], показал наибольшую эффективность в разработке горных сетей карьерных транспортных инфраструктур, способных работать в стохастических средах реального времени.

Информация в транспортной сети может обрабатываться централизованно или децентрализованно. Централизованный подход, гарантируя оптимальность решения, страдает существенными недостатками: требованием полноты информации, увеличением времени реакции при большом количестве транспортных средств и задержками передачи данных между машинами и диспетчерским центром. Это стимулировало развитие децентрализованных систем на базе нейросетей, обеспечивающих более быструю, динамичную систему транзита рудной массы, менее дорогостоящую связь и большую автономию транспортных средств.

Анализ литературы показывает, что, несмотря на наличие технологических разработок, почти две трети современных функций интеллектуальной диспетчеризации игнорируются на предприятиях из-за низкой квалификации персонала и отсутствия стимулов внедрения новых

технологий у собственников. Наблюдается дефицит исследовательских работ, связывающих технологические инновации в транспортировке руды с конечными бизнес-показателями. Это определяет актуальность данного исследования, которое рассматривает транспортную подсистему как часть единой цепочки создания ценности.

3. Материалы и методы исследования

Методологической основой работы является концепция цепочки создания ценности М. Портера. Данный инструмент позволяет системно идентифицировать внутренние виды деятельности, добавляющие ценность, и определить их влияние на норму прибыли. В рамках исследования деятельность горнодобывающего предприятия разделена на два типа: основные и вспомогательные виды деятельности.

К основным видам деятельности, непосредственно участвующим в создании и доставке продукта (руды), относятся:

Входящая логистика: получение, хранение и управление запасами входных материалов: топлива, генераторов, запасных частей, взрывчатых веществ, а также повседневное обеспечение.

Операции: подготовка новых уступов и съездов, выполнение буровзрывных работ, погрузка, транспортировка, разгрузка и снабжение рудой дробильных установок обогатительной фабрики.

Транспортировка: перемещение рудной массы от забоя до обогатительной фабрики, складов или отвалов. Это ключевой элемент анализа, краеугольный камень транспортного этапа в рамках эксплуатационных горных работ.

Исходящая логистика: контроль и мониторинг мест разгрузки рудного материала с точки зрения тоннажа и качества, усреднение, отгрузка руды.

Маркетинг и сервис: мультимедийная реклама, участие в выставках для продвижения продукции, брендинг, стратегии анализа продаж, послепродажное обслуживание для обеспечения удовлетворенности клиентов.

Вспомогательные виды деятельности обеспечивают функционирование основных:

Закупки: согласование наилучших цен на поставку сырья, машин, оборудования, услуг.

Технологическое развитие: цифровизация, телекоммуникации, автоматизация, искусственный интеллект, интеллектуальный анализ данных, исследовательские проекты. Четвертая промышленная революция основана на девяти столпах: большие данные и аналитика, роботы, имитационное моделирование, системная интеграция, Интернет вещей, кибербезопасность, облачные вычисления, аддитивное производство и дополненная реальность. Концепция Горное дело 4.0 дополняет этот список искусственным интеллектом и цифровыми двойниками.

Управление человеческими ресурсами: найм и обучение квалифицированных сотрудников.

Инфраструктура фирмы: финансы, юриспруденция, стратегическое планирование, бухгалтерия.

Все виды деятельности взаимосвязаны друг с другом (внутренние связи), что подразумевает: изменение в одном вызывает изменение в другом, положительное или отрицательное. Вспомогательные виды деятельности распространяются на все основные, что указывает на циклическую связь между ними.

Основной исследовательский фокус направлен на изучение внутренних связей между вспомогательной деятельностью (технологическое развитие) и основной деятельностью (транспортировка, входящая логистика). Гипотеза исследования заключается в том, что модернизация транспортной архитектуры на базе алгоритмов ИИ оказывает мультипликативный положительный эффект на всю цепочку создания ценности. Изменения в одном звене (технологии) запускают каскад улучшений в связанных звеньях (логистика, операции, закупки), что в итоге ведет к росту нормы прибыли. Для проверки гипотезы проводится анализ данных, представленных в современных исследовательских работах.

4. Результаты и их обсуждение

Применение анализа цепочки создания ценности к транспортной подсистеме горного предприятия позволяет проследить синергетический эффект от внедрения интеллектуальных алгоритмов управления транспортными процессами карьера.

Интеграция GPS-трекинга и телематики в интеллектуальную начинку карьерных самосвалов обеспечивает мониторинг расхода топлива и состояния машин в реальном времени (входящая логистика). Телематика, предоставляет менеджерам множество преимуществ: снижение затрат, повышение производительности, обеспечение профилактического обслуживания, продление срока службы оборудования, интеграцию данных с бизнес-системами. Предиктивная аналитика, прогнозирует потребности в техническом обслуживании на основе моделей использования, сокращая время простоев за счет своевременного ремонта. Возможности обмена данными в реальном времени ведут к лучшему распределению ресурсов, стратегическому планированию и снижению эксплуатационных расходов на этапе разведки, добычи, транспортировки руды.

В рамках основной деятельности: добычи и транспортировки, применение нейронных систем решает задачу динамического распределения загрузки взаимодействия транспортной цепи «экскаватор-самосвал». Традиционные подходы имеют недостатки: подход назначения, составляющий большинство разработанных моделей диспетчеризации, может работать неудовлетворительно, поскольку экскаватору может потребоваться более одного грузовика для выполнения производственного плана. Мультифакторный подход на основе ИИ позволяет последовательно решать

задачи поиска кратчайшего пути и синхронного распределения техники, приближаясь к полной автономии.

Исследователи Чжан и др.[2], используя мультиагентные алгоритмы глубокого обучения с подкреплением для динамического распределения ресурсов «грузовик-экскаватор», добились значительного улучшения производительности на 5,56% по сравнению с традиционными подходами.

Хо и др.[3] успешно сократили выбросы парниковых газов в горном деле более чем на 30% с помощью интеллектуальной диспетчеризации в реальном времени, эффективно балансируя между производительностью автопарка, эксплуатационной неопределенностью и воздействием на окружающую среду.

Димитракопулос [4] применил алгоритмы RL для оптимизации доставки материала, добытого экскаваторами, на перерабатывающий завод. Результаты показали увеличение производства меди на 12-16% и золота на 20-23% по сравнению с базовыми стратегиями.

Цепочка влияния на норму прибыли, выявленная в результате анализа, выглядит следующим образом: технологическое совершенствование диспетчеризации транспортных потоков карьерного транспорта (вспомогательная деятельность) ведет к экономии топлива во входящей логистике, что приносит ощутимые экономические выгоды компании (инфраструктура фирмы) за счет уменьшения средств на закупку топлива.

Модернизация диспетчеризации горнотранспортной цепочки повышает тоннаж добычи руды, что требует от маркетингового подразделения усилий по привлечению большего количества клиентов, а от отдела кадров-найма более квалифицированных маркетологов. Точное планирование технического обслуживания автопарка карьерных самосвалов приводит к меньшей потребности в запасных частях и, следовательно, к меньшим усилиям со стороны отдела закупок, значительному снижению затрат на приобретение запасных частей для карьерного транспорта.

Таким образом, изменения в одной точке цепочки запускают каскад улучшений во всех связанных звеньях. В 2025 году мировой рынок ИИ в горном деле оценивался в 9 млрд долларов, и прогнозируется его рост до 27 млрд к 2030 году, однако эти изменения касаются в первую очередь компаний-флагманов инноваций, уже знакомых с внедрением технологий.

5. Выводы

Проведенное исследование, основанное на анализе цепочки создания ценности, позволяет сделать следующие выводы:

1. Транспортно-технологическая схема доставки руды является ключевым звеном, через которое технологические инновации транслируются в экономический результат. Модернизация этого звена на базе алгоритмов ИИ и киберфизических систем оказывает прямое регулятивное влияние на норму прибыли предприятия, открывая возможность для более широкого внедрения технологий концепции Горное дело 4.0 как в диспетчеризацию звена

«экскавация-транспортировка», так и вдоль всей эксплуатационной цепочки создания ценности.

2. Децентрализованные системы управления (LP, MILP) на основе обучения с подкреплением демонстрируют существенное превосходство над традиционными методами (в условиях высокой динамики и стохастичности открытых горных работ, обеспечивая прирост производительности до 5-23% и значительное снижение экологического воздействия).

3. Анализ внутренних связей в цепочке ценности показывает, что внедрение нейросетевой диспетчеризации транспортных потоков создает мультипликативный эффект, оптимизируя не только перевозки, но и смежные процессы: закупку топлива, техническое обслуживание, маркетинг и управление персоналом.

4. Основным барьером для массового использования технологий концепции Горное дело 4.0 является недостаточная осведомленность акционеров и менеджмента о долгосрочных экономических выгодах его внедрения, низкая квалификация персонала. Просветительские исследования в этой области необходимы как для промышленности, так и для академического сообщества, поскольку они формируют более широкий кругозор у студентов-горняков и логистов, специалистов-практиков.

5. Литературный обзор показал, что целостное определение и системные исследования экономической составляющей транспортных процессов перевозки рудной массы все еще отсутствуют в горной литературе и литературе по промышленной логистике, что определяет необходимость вести масштабную исследовательскую траекторию на долгие годы вперед.

Необходимы комплексные исследования, включающие: изучение интеграции новых технологий (ИИ, Интернет вещей); тщательный анализ затрат и выгод; исследование человеческого фактора и программ обучения.

Список литературы:

1. Bastos, G.S.; Souza, L.E.; Ramos, F.T.; Ribeiro, C.H.C. A Single-Dependent Agent Approach for Stochastic Time-Dependent Truck Dispatching in Open-Pit Mining. In Proceedings of the 2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Washington, DC, USA, 5–7 October 2011.
2. 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), Atlanta, GA, USA, 10–13 December 2020.
3. Huo, D.; Sari, Y.A.; Kealey, R.; Zhang, Q. Reinforcement Learning-Based Fleet Dispatching for Greenhouse Gas Emission Reduction in Open-Pit Mining Operations. *Resour. Conserv. Recycl.* 2023, 188, 106664
4. S Ramazan, R Dimitrakopoulos. Production scheduling with uncertain supply: a new solution to the open pit mining problem. *Optimization and engineering*, 2013, 14, 2, 361-380