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

Системы управления в горнодобывающей промышленности*

Management systems in the mining industry

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-12-91-96

В настоящее время эксплуатационные расходы горнодобывающих предприятий вообще (и карьеров в частности) имеют тенденцию к росту. С другой стороны, традиционные системы управления парками горнотранспортного оборудования не справляются с большой размерностью, стохастичностью и автономностью, необходимыми для все более сложных операций по добыче полезных ископаемых открытым способом. Эти причины побуждают исследователей искать альтернативы, включая алгоритмы на основе искусственного интеллекта, рекомендованные требованиями «Майнинга 4.0». В данной статье представлен обзор систем управления в горнодобывающей промышленности. Обзор позволил получить представление об эволюции систем управления для карьеров и потребности в интеллектуальных алгоритмах.

Ключевые слова: *открытые горные работы, система управления, искусственный интеллект, горнотранспортное оборудование, Майнинг 4.0, планирование.*

Для цитирования: Системы управления в горнодобывающей промышленности / А.Ю. Воронов, В.В. Аксенов, Г.Д. Буялич и др. // Уголь. 2025;(12):91-96. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-12-91-96.

Abstract

Currently, the operating costs of mining enterprises in general (and quarries in particular) tend to increase. On the other hand, traditional mining equipment fleet management systems cannot cope with the large size, stochasticity and autonomy required for increasingly complex open-pit mining operations. These reasons encourage researchers to look for alternatives, including algorithms based on artificial intelligence, recommended by the requirements of "Mining 4.0". This article provides an overview of management systems in the mining industry. The review provided insight into the evolution of management systems for quarries and the need for intelligent algorithms.

Key words

Open-pit mining, management system, artificial intelligence, mining equipment, Mining 4.0, planning.

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

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. Management systems in the mining industry. *Ugol'*. 2025;(12): 91-96. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-12-91-96.

ВВЕДЕНИЕ

В 2021 г. 40 крупнейших горнодобывающих компаний мира получили чуть менее 1 трлн дол. США совокупного дохода. Этот год стал рекордным для отрасли, однако чистая прибыль составила всего 17% – на треть меньше, чем в 2011 г. (24%). Это было связано с огромными эксплуатационными затратами в размере почти 600 млрд дол. США, что оказалось на 30% больше по сравнению с 2020 г., с последовавшим затем ростом на 15% в 2022 г. Чтобы сохранить конкурентные преимущества, ведущим горнодобывающим компаниям не остается ничего иного, кроме использования в своей деятельности технологических достижений. Наиболее важный и дорогостоящий вид деятельности любого проекта по открытой добыче полезных ископаемых – погрузочно-транспортные работы [1, 2, 3]. Переходу способствуют и другие движущие силы, такие как постоянно растущий спрос на критически важные минералы или потребность в чистой энергии и снижении вредных выбросов.

Борьба с глобальным потеплением и удовлетворение растущих потребностей – две противоречивые цели. Однако эти финансовые и экологические цели достижимы с помощью интегрированной системы управления (СУ) погрузочно-транспортным парком, в которую встроены новейшие технологии, чтобы лучше адаптироваться к высокодинамичной проблеме переработки полезных ископаемых. СУ выполняют весь спектр функций от диспетчеризации до управления топливом, техническим обслуживанием (ТО) и безопасностью, способствуя созданию эффективной и безопасной рабочей среды. Чем больше ожиданий возникает в отрасли, тем больше возникает потребностей в использовании многоцелевых СУ, а это означает, что традиционные методы оптимизации больше не отвечают требованиям производства, и должен начаться поиск альтернативных решений [4, 5, 6].

С внедрением искусственного интеллекта (ИИ) во все аспекты повседневной жизни человечества эта область уже не является неизученной. Различные методы на основе ИИ уже используются в широком спектре отраслей, а в некоторой

степени и в горнодобывающей промышленности. В качестве примера можно привести беспилотные самосвалы на железорудных карьерах Австралии, использующие алгоритмы ИИ для навигации, эксплуатации и выполнения задач без прямого вмешательства человека. Тем не менее на других предприятиях в других частях мира это пока не является распространенной практикой. Суровая правда заключается в том, что в некоторых местах традиционные СУ, которым не менее 30 лет, либо вообще не применяются, либо были внедрены совсем недавно. Эти наблюдения указывают на необходимость дальнейших усилий для более глубокого признания интеллектуальных СУ, особенно в эпоху «Майнинга 4.0» [7, 8, 9].

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

История современных СУ в горнодобывающей промышленности берет начало в управлении логистикой автомобильных перевозок. В этом разделе описываются концепция СУ и ее атрибутов, а также эволюция СУ в карьерах от обычных до интеллектуальных.

Концепция системы управления

ЦП – это «структурированный производственный процесс, в котором сырье преобразуется в готовые изделия, а затем доставляется конечным потребителям» [10]. Таким образом, ЦП охватывает ряд взаимосвязанных цепочек (операций), включая поставку, производство, логистику и потребление. Логистика определяется как операция, связанная с транспортировкой и хранением материалов, деталей и продуктов в ЦП. Управление ЦП относится к набору методов, используемых для эффективной координации поставщиков, производителей, складов и магазинов, чтобы обеспечить быструю, надежную, экономически эффективную и гибкую ЦП, достаточную для удовлетворения потребностей клиентов. Поскольку управление ЦП оптимизирует операции по всей ЦП, управление логистикой также направлено на обеспечение эффективной доставки и хранения товаров или услуг между точкой происхождения и точкой потребления посредством управления автопарком, управления запасами, переработкой материалов и выполнением заказов [10].

Транспортный парк компании состоит из коммерческих транспортных средств (ТС) – автомобилей, кораблей, самолетов и т.д. Управление парком охватывает многочисленные функции закупок оборудования, ТО, телематики, управления водителями, скоростью, топливом и охраной труда. Управление парком под эгидой управления логистикой улучшает планирование, производительность, качество обслуживания и эффективность, а также минимизирует затраты и риски. СУ описываются как широкий спектр решений для различных операций в области транспортировки, дистрибуции и логистики. Они обязаны своим существованием компьютерно-интегрированным ТС, общающимся через спутниковые и наземные беспроводные сети и появившимся в 1980-х годах.

Это достижение было бы невозможно без появления телематики – сочетания телекоммуникаций и информатики. Впервые представленная в 1978 г. эта концепция изначально использовалась для автомобильной промышленности и отслеживания ТС в логистических автопарках. Телематика – это многопрофильная область исследований, включающая коммуникации, технологии ТС, автомобильный транспорт, электротехнику и информатику. Это инструмент, используемый для отслеживания и связи с ТС. Он предоставляет менеджерам автопарков многочисленные преимущества, включая снижение затрат, повышение производительности и рентабельности, предоставление профилактического обслуживания, продление срока службы оборудования, повышение эффективности использования оборудования и времени безотказной работы, улучшение обслуживания и удовлетворенности клиентов, интеграцию данных оборудования с бизнес-системами и снижение риска потерь из-за кражи или несанкционированного использования [11].

Эксплуатационные характеристики автопарка можно классифицировать по четырем признакам: размеру, рабочему диапазону, изменчивости маршрутов и чувствительности доставки ко времени [10]. По первому признаку различаются четыре основных размера: малые (< 20 ТС), средние (20-100 ТС), большие (100-500 ТС) и очень большие (> 500 ТС). Второй признак указывает на сферу деятельности – локальную, региональную или национальную. Перевозчики, работающие на фиксированных маршрутах в течение определенного периода, отличаются от перевозчиков с переменными маршрутами и расписаниями. Срочность доставки описывается как низкая, средняя или высокая чувствительность ко времени.

Рассматриваемая как статическая и детерминированная в своей классической форме задача маршрутизации ТС является краеугольным камнем ЦП и управления автопарком. Модель маршрутизации в СУ называется динамической, если на нее влияет обратное действие параметров со временем. В статических системах вся информация о маршрутах доступна заранее и неизменна после первоначального планирования, тогда как в динамическом режиме часть атрибутов не только заранее не известна, но и может быть изменена после построения начальных маршрутов. С одной стороны, задача маршрутизации является стохастической задачей оптимизации из-за работы с будущими событиями, несущими неопределенность. С другой стороны, она является динамической задачей, поскольку новые обновления появляются во время выполнения плана маршрутизации. Чтобы справиться с непредвиденными событиями, динамическая СУ в реальном времени необходима для мгновенной повторной оптимизации первоначального плана перевозок.

Информация в СУ обрабатывается либо централизованно, либо децентрализованно. При централизованном управлении оператор автопарка (человек или автоматизированная система) удаленно отправляет ТС глобально оптимальные планы после рассмотрения всей соответствующей информации. Несмотря на гарантию оптимального решения, возникают недостатки:

– требование полной информации о сети и задачах;

– сокращение времени отклика автопарка из-за вычислительных и коммуникационных ограничений в системах с большим автопарком;

– запоздалая передача данных от машины к машине и от центра к машине для своевременной обработки центральным блоком. Эти аспекты вместе с технологическими достижениями в проектировании и производстве компактных мини-компьютеров привлекли внимание к децентрализованному подходу, при котором возможны более быстрая, менее дорогая связь и большая автономность ТС.

В то время как СУ первого поколения были предназначены для обычного отслеживания ТС, второе поколение развилось в инструменты планирования для выполнения более сложных задач. Третье же поколение близко к тому, чтобы превратиться в автономные киберфизические системы, использующие в своей архитектуре цифровые двойники и блоки принятия решений на основе ИИ. Горнодобывающая промышленность пережила ряд метаморфоз в своих системах управления автопарком, начиная от ручных и заканчивая автоматическими режимами диспетчеризации.

Следующий подраздел содержит общий обзор обычных и интеллектуальных СУ для открытой добычи полезных ископаемых.

Системы управления в горнодобывающей промышленности

Планирование горных работ может иметь долгосрочный, среднесрочный, краткосрочный и оперативный горизонты. Стратегическое планирование фокусируется на долгосрочных и среднесрочных перспективах и ставит цели, которые соответствуют видению и миссии организации. Тактическое планирование имеет более узкие временные рамки – до 1 месяца. Оперативное планирование охватывает расстановку и диспетчеризацию оборудования за время от 1 секунды до 1 дня. Горнодобывающие операции вызывают около половины общих эксплуатационных расходов, а также десятую часть мировых выбросов парниковых газов, связанных с энергетикой. СУ горным оборудованием необходимы для оптимизации производительности технологического погрузочно-транспортного парка, поскольку даже небольшие изменения могут привести к значительным денежным и экологическим выгодам. Для управления эксплуатационным парком на участках добычи в основном применяются одноуровневые или многоуровневые СУ горным оборудованием. Одноуровневые системы не учитывают производственные потребности, а задания для единиц техники определяются критериями диспетчеризации. С другой стороны, многоуровневый подход пытается последовательно решать проблемы поиска кратчайшего пути, расстановки (верхний уровень) и диспетчеризации (нижний уровень) [12].

Обычные системы управления

Некоторые авторы для решения задач расстановки применяли теорию массового обслуживания (ТМО), ярким примером является работа [13]. Однако ТМО ограничена ее предположением о предсказуемых входных данных и ее узкой областью применения для определенных типов задач, что приводит к неточным результатам в реальных, неопределенных и сложных ситуациях, включающих несколько взаимодействующих переменных [14]. Таким образом, методы исследования операций на основе математического программирования стали наиболее распространенными инструментами оптимизации парка. Авторы работы [15] предложили модель линейного программирования (ЛП) для достижения производственных целей в течение определенного времени с использованием двух слабосвязанных моделей. Первая модель направлена на расчет интенсивности работы экскаваторов, а вторая – на расстановку минимального количества самосвалов по каждому маршруту для соответствия требуемой интенсивности грузопотоков на маршрутах. В работе [16] ЛП использовалось для связи СУ со стратегическими планами посредством назначений экскаваторов. Другое направление исследований относилось к смешанному целочисленному ЛП, используемому некоторыми авторами [17]. Модели на основе ЛП критикуются за необходимость указывать приемлемый диапазон для эксплуатационных ограничений, например коэффициента вскрыши и требуемого качества сырья (как правило, руды), поэтому на верхнем уровне применялось и целевое программирование [15].

На нижнем уровне выделяются два основных подхода: модель назначений и транспортная модель. В большинстве существующих систем распределения самосвалов модель назначений направляет каждый самосвал к каждому экскаватору в соответствии с целью, такой как минимум времени ожидания, как в работе [16]. Однако задача о назначениях может не работать удовлетворительно, поскольку экскаватору может потребоваться более одного самосвала, чтобы выполнить свой производственный план. Чтобы решить эту проблему, авторы работы [15] прибегли к решению транспортной задачи, определив необходимый экскаватор и количество требуемых самосвалов. Помимо этих фундаментальных методов на нижнем уровне применяются и генетические алгоритмы [17]. Хотя традиционные методы хорошо изучены, их применение может быть проблематичным в задачах оптимизации большой размерности и стохастических средах, подобных тем, что имеют место на реальных горных работах. Поэтому в течение последнего десятилетия все чаще используются алгоритмы с поддержкой ИИ для разработки более совершенных СУ.

Интеллектуальные системы управления

После двух десятилетий рецессии, вызванной аппаратными ограничениями и невозможностью обработки больших данных, машинное обучение (МО) как подмножество ИИ получило новую жизнь в 2012 г. и прокладывает себе путь во все аспекты человеческой жизни. МО использует три основные стратегии: обучение с учителем, обучение без учителя и обучение с подкреплением (RL) для выполнения прогнозирования, распознавания образов, классификации и оптимизации различных типов входных данных, таких как текст, изображение, голос

или видео. С целью поиска наиболее эффективных решений в горнодобывающих СУ исследователи применяли и сравнивали различные методы МО, такие как случайные леса, *k*-ближайших соседей, линейная регрессия, деревья решений, метод опорных векторов и искусственные нейронные сети [18]. Слабость обучения с учителем в точном учете и представлении изменений, происходящих в реальном времени, создала новое направление исследований в разработке карьерных СУ, известное как подход на основе RL. Оно было инициировано в работе [19] и продолжено в работах [20, 21].

СУ горнодобывающими системами на основе RL сейчас находятся на начальной стадии развития и должны пройти еще долгий путь, чтобы достичь зрелости. Разработанные на сегодняшний день модели не учитывают многоаспектные цели и требования горнодобывающих операций, таких как обогатительные фабрики, места складирования полезных ископаемых или вскрыши в карьере или вне карьера, а также союз со стратегическими планами. Исследования показывают, что почти две трети функций расстановки и диспетчеризации игнорируются в интеллектуальных СУ горнодобывающими системами, разработанными на сегодняшний день. Однако эти технические недостатки не имеют отношения к сфере данного исследования, поскольку здесь основное внимание уделяется экономическим аспектам использования интеллектуальных СУ на открытых горных работах и тому, как этот переход может привести к увеличению прибыли по всей ЦСС эксплуатации. Некоторые менеджеры и акционеры сомневаются в экономической обоснованности таких интеллектуальных систем. Таким образом, изложение достоинств технологических достижений в СУ необходимо для прокладывания пути к дальнейшему развитию и применению таких систем в горнодобывающем секторе. Основная цель этой перспективы ЦСС заключается в предоставлении необходимого общего обоснования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Горнодобывающий сектор исторически служил краеугольным камнем мировой экономики, внося значительный вклад в производство жизненно важных товаров и ресурсов, используемых многочисленными отраслями промышленности. Эта отрасль охватывает многогранную и сложную серию ЦСС, обычно начинающихся с разведки и разработки, продолжающихся эксплуатацией, переработкой и очисткой и завершающихся маркетингом и продажами. На различных этапах технологии ИИ предлагает возможности для оптимизации операций и сокращения расходов, например в системах разведки для облегчения обнаружения полезных ископаемых, автоматизации систем переработки сырья с помощью робототехники и автономного оборудования или анализа данных, полученных во время переработки и очистки, для соответствующего улучшения переработки.

В 2021 г. мировая индустрия интеллектуальной добычи полезных ископаемых оценивалась примерно в 9 млрд дол. США, и прогнозы указывают на то, что эта цифра может увеличиться в три раза к 2027 г. Ожидается, что автоматизация в этом секторе значительно расширится в течение следующего десятилетия; при этом предсказывают, что рыночная стоимость решений по автоматизации вырастет с почти 2 млн дол. США в 2017 г. до чуть более 4 млн дол. США к 2026 г. Однако эти прогнозы основаны на определенной группе известных горнодобывающих компаний, уже знакомых с сутью внедрения технологий в свои системы. Основная проблема заключается в охвате слаборазвитых компаний по всему миру принципами «Майнинга 4.0» и базовыми технологиями, сопровождаемыми этой новой парадигмой. Таким образом, исследования, освещающие эту новую область, вносят существенный вклад в пропаганду прибыльной добычи полезных ископаемых во всем мире, особенно с учетом того, что эксплуатационные расходы имеют тенденцию к росту, как упоминалось в начале.

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. 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.).
5. 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, 2020:03022. DOI: 10.1051/e3sconf/202017703022.

6. Чехлар М., Жиронкин С.А., Жиронкина О.В. Цифровые технологии Индустрии 4.0 в Майнинге 4.0 – перспективы развития геотехнологии в XXI веке // Вестник КузГТУ. 2020. № 3. С. 80-90. Cekhlar M., Zhironkin S.A., Zhironkina O.V. Digital technologies of Industry 4.0 in Mining 4.0 – prospects for the development of geotechnology in the XXI century. *Vestnik KuzGTU.* 2020;(3):80-90. (In Russ.).
7. Жиронкина О.В. Становление Майнинга 4.0 как отраслевой инновационной технологической платформы Индустрии 4.0 в свете достижения технологического суверенитета // Экономика и управление инновациями. 2022. № 3(22). С. 60-77. Zhironkina O.V. Establishment of Mining 4.0 as an industry innovative technological platform of Industry 4.0 in the light of achieving technological sovereignty. *Economics and Innovation Management.* 2022;3(22):60-77. (In Russ.).
8. Keropyan A.M., Kuziev D.A., Krivenko A.E. Process Research of Wheel-Rail Mining Machines. Traction Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2020, pp. 703-709.
9. Kouziyev D., Krivenko A., Chezganova D., Blumensteiun V. Sensing of dynamic loads in the open-cast mine combine. E3S Web of Conferences. 105;(2):03014 DOI:10.1051/e3sconf/201910503014.
10. Feller A., Shunk D., Callarman T. Value chains versus supply chains. *BP Trends.* 2006;(1):1-7.
11. Beamon B.M. Supply chain design and analysis: models and methods. *International Journal of Production Economics.* 1998;(55):281-294.
12. Zijm H., Klumpp M., Heragu S., Regattieri A. Operations, logistics and supply chain management: definitions and objectives. In: Operations, Logistics and Supply Chain Management; Spring: Berlin/Heidelberg, Germany, 2019, pp. 27-42.
13. Afrapoli A.M., Askari-Nasab H. Mining fleet management systems: a review of models and algorithms. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment.* 2019;33(1):42-60.
14. Ercelebi S.G., Bascetin A. Optimization of shovel-truck system for surface mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2009;(109):433-439.
15. Gurgur C.Z., Dagdelen K., Artittong S. Optimisation of a real-time multi-period truck dispatching system in mining operations. *International Journal of Applied Decision Sciences.* 2011;(4):57-79.
16. Afrapoli A.M., Askari-Nasab H. A stochastic integrated simulation and mixed integer linear programming optimisation framework for truck dispatching problem in surface mines. *International Journal of Mining and Mineral Engineering.* 2020;(11):257-284.
17. Mohtasham M., Mirzaei-Nasirabad H., Alizadeh B. Optimization of truck-shovel allocation in open-pit mines under uncertainty: a chance-constrained goal programming approach. *Mining Technology.* 2021;(130):81-100.
18. Temeng V., Otunoye F., Frendewey J. Real-time truck dispatching using a transportation algorithm. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment.* 1997;11(4):203-207.
19. Choi Y., Nguyen H., Bui X.-N., Nguyen-Thoi T. Optimization of haulage-truck system performance for ore production in open-pit mines using big data and machine learning-based methods. *Resources Policy*. 2022;(75): 102522.
20. De Carvalho J.P., Dimitrakopoulos R. Integrating production planning with truck-dispatching decisions through reinforcement learning while managing uncertainty. *Minerals.* 2021;(11).
21. 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.

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 of 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