

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

MINING AND MINERAL PROCESSING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.271

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-1-4-15



РОБОТИЗИРОВАННАЯ ТЕХНИКА ДЛЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Хазин М.Л.

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): для повышения конкурентоспособности горным предприятиям следует увеличивать эффективность труда и уровень безопасности работ. Основным технологическим звеном при добыче полезных ископаемых является горнотранспортный комплекс, поэтому разработка роботизированных систем является важной задачей развития горной промышленности России. **Цель работы:** анализ направлений, проблем и целесообразности использования роботизированных технологий разработки месторождений. Оценка технико-экономической эффективности применения автоматизированных систем для добычи полезных ископаемых. **Используемые методы:** применялись методы системного анализа, математической статистики, научного обобщения показателей работы роботизированных горных машин и оборудования. **Результат:** проанализировано современное состояние, перспективы и общие направления развития роботизированного горного оборудования. Рассмотрены передовые виды зарубежной и российской автоматизированной техники, а также основные концепции и программы развития Российской Федерации в сфере роботизации. Показано, что автономные транспортные средства будут применяться все в более широких масштабах, что может в корне изменить наше представление о добыче и транспортировке горной массы. Эти машины могут работать в суровых, динамичных и неопределенных условиях, таких как арктический холод или зной пустыни, в глубоких подземных шахтах, где может быть очень жарко и влажно или высоко в горах. На сегодняшний день области применения робототехники в горнодобывающей промышленности включают автоматизированное дозирование, выемку грунта и транспортировку, картирование и геодезию, бурение и обработку взрывчатых веществ. Применение робототехники в горнодобывающей промышленности предъявляет особые требования к ее надежности и качеству, порождает многочисленные проблемы и нерешенные вопросы, которые должны быть совместно определены и решены как научными крутами, так и промышленностью. **Практическая значимость:** роботы являются ключевыми инструментами для повышения производительности, поскольку они выполняют широкий спектр ручных задач более эффективно и последовательно, чем люди. Горнодобывающая промышленность имеет большой потенциал для автоматизации, с применением которой появляется возможность для оптимизации, поскольку становится доступно больше информации, а действия могут многократно повторяться с высокой точностью. Важнейшим достоинством роботизированных систем является повышение уровня безопасности за счет вывода человека из зоны ведения горных работ. Широкое применение роботизированной техники на открытых и подземных горных работах может привести к существенным изменениям при проектировании карьеров, шахт и правил безопасности, а также способствовать разработке новых видов горных машин и оборудования, что обеспечит значительное повышение эффективности добычи полезных ископаемых.

Ключевые слова: горное дело, роботизированная техника, автоматизированные системы, карьерные машины, безопасность производства, система управления, эффективность.

© Хазин М.Л., 2020

Для цитирования

Хазин М.Л. Роботизированная техника для добычи полезных ископаемых // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №1. С. 4–15. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-4-15>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ROBOTIC EQUIPMENT FOR MINING OPERATIONS

Mark L. Khazin

Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance): To increase competitiveness, mining enterprises should increase labor efficiency and the level of work safety. A main technological link in the extraction of minerals is the mining transport complex. So, the development of robotic systems is an important task for the development of the mining industry in Russia. **Objectives:** The objectives of the paper is to analyze directions, problems and feasibility of using robotic mining technologies; to assess the technical and economic efficiency of automated systems in mining. **Methods Applied:** Methods of system analysis, mathematical statistics, scientific generalization of the performance indicators of robotic mining machines and equipment were used. **Findings:** The author analyzed the current state, prospects and general directions of development of robotic mining equipment. The advanced types of foreign and Russian automated technology, as well as the basic concepts and robotics development programs of the Russian Federation, are considered. It is shown that autonomous vehicles will be used on a larger scale, and this can fundamentally change our understanding of the extraction and transportation of rock mass. These machines can operate in harsh, dynamic and uncertain conditions, such as arctic cold or desert heat, in deep underground mines, where it can be very hot and humid or high in the mountains. Today, areas of application of robotics in the mining industry include automated dosing, excavation and transportation, mapping and geodesy, drilling and processing of explosives. The use of robotics in the mining industry places special demands on reliability and quality, gives rise to numerous problems and unresolved issues that must be jointly identified and resolved by both the scientific community and industry. **Practical Relevance:** Robots are key tools for increasing productivity as they perform a wide range of manual tasks more efficiently and consistently than humans. The mining industry has great potential for automation, giving rise to an opportunity for optimization, since more information becomes available, and actions can be repeated many times with high accuracy. The most important advantage of robotic systems is to increase the level of safety due to the withdrawal of man from the mining zone. A widespread use of robotic equipment in open and underground mining can lead to significant changes in the design of quarries, mines, and safety rules, as well as contribute to the development of new types of mining machinery and equipment, which will significantly increase the efficiency of mining.

Keywords: mining, robotic equipment, automated systems, mining trucks, production safety, control system, efficiency.

For citation

Khazin M.L. Robotic Equipment for Mining Operations. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 1, pp. 4–15. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-4-15>

Введение

Горная промышленность находится в постоянном развитии, что обуславливает применение инновационных технологий и современного оборудования. Повышение эффективности работы горного предприятия может обеспечиваться за счет повышения производительности процесса транспортирования горной массы, экономии топлива, сокращения автопарка, уменьшения расходов на эксплуатацию и техническое обслуживание.

При разработке месторождений многие годы применялись автоматизированные системы для стационарного оборудования, а в настоящее время на рудниках, карьерах и в шахтах стали использовать автономное техническое оборудование для увеличения безопасности труда и экономичности производства.

Автоматизация горной промышленности проводится по нескольким направлениям – от

непосредственно добывающего оборудования до технологического транспорта и других технических средств. С 2016 года значительно увеличилось применение роботизированных систем в горной промышленности – автономных самосвалов, поездов, буровых установок, позволившее увеличить эффективность добычи полезных ископаемых и снизить нехватку рабочих кадров, что весьма существенно для экономически развитых стран с высоким уровнем средней заработной платы.

В последние годы производство робототехники переживает мощный подъем. В 2019 г. объем мирового рынка промышленных автоматизированных систем управления составил 16 млрд долларов, а его рост (по прогнозу Международной федерации робототехники) ожидается 10–12% в год. Автоматизация становится необходимой в отраслях, где работодатели особенно часто сталкиваются с недостатком квалифицированных кадров и возрастающими затратами на

рабочую силу. Особенно ускоренно робототехника развивается в таких областях, как здравоохранение, где миниатюрные роботы, перемещаясь по кровеносным сосудам, могут выполнять различные операции; обороноспособность, где военная техника, управляемая роботами, минимизирует потери личного состава; обрабатывающая промышленность, где роботы повышают производительность на 60–70%, и горнодобывающая отрасль.

Добыча полезных ископаемых – это практика добычи ресурсов. Сегодня международный бизнес по добыче полезных ископаемых является сильно механизированной отраслью, в которой используется мощное дизельное и электрическое оборудование. Эти машины должны работать в суровых, динамичных и неопределенных условиях, таких как арктический холод или зной пустыни, в глубоких подземных шахтах, где может быть очень жарко и влажно, или высоко в горах [1–3].

В ближайшее время основным направлением развития мировой горнодобывающей промышленности останется открытый способ разработки полезных ископаемых. Их добыча проводится практически во всех климатических зонах во все более опасных и сложных горно-геологических и природных условиях, в труднодоступных регионах, осложняемых углублением карьеров, запыленностью, загазованностью и сложностью проветривания.

Эти и другие факторы оказывают негативное влияние на здоровье персонала. При постоянном воздействии выхлопных газов дизельных двигателей горного оборудования на организм развиваются бронхиты, иммунодефицит, страдает нервная система, сосуды головного мозга и другие органы. Например, рак легких был обнаружен у горнорабочих, подвергавшихся действию выхлопных газов на протяжении 10–20 лет. Кроме того, машинисты экскаваторов и водители карьерных самосвалов постоянно подвергаются воздействию вибрации [4, 5]. Горные работы, как одна из наиболее опасных профессий в мире, связана с риском для жизни. Согласно данным Международной организации труда (ИТО), всего десять лет назад число рабочих горнодобывающей отрасли составляло только один процент мировой рабочей силы, но на него приходилось восемь процентов несчастных случаев с летальным исходом.

Суровые условия Арктики и Сибири, гор и пустынь, районы с недостаточно развитой социальной инфраструктурой существенно осложняют участие человека в технологии добычи полезных ископаемых, вызывают проблемы не-

хватки квалифицированного персонала [2, 6, 7].

При наличии жесткой конкуренции между горнодобывающими компаниями, усложнения условий работы технологического транспорта, повышения интенсивности процессов добычи, ужесточения требований к охране труда и экологии особое значение приобретает роботизация технологического процесса разработки месторождений. Это позволяет повысить безопасность и производительность труда за счет оптимизации технологического процесса и исключения человеческого фактора [3, 7, 8].

Текущее состояние отрасли

Основной частью технологического процесса добычи полезных ископаемых является горно-транспортный комплекс, поэтому роботизация горных машин и оборудования на открытых и подземных горных работах служит одним из главных направлений повышения безопасности и эффективности труда. В этом направлении значительных успехов достигли основные производители карьерных самосвалов – Caterpillar, Komatsu и Hitachi, причем на рынке беспилотной большегрузной техники Caterpillar считается пионером. Компания представила первый автономный автомобиль более 20 лет назад, а сегодня количество роботизированных самосвалов и бульдозеров, работающих в горной промышленности по всему миру, исчисляется сотнями. На март 2019 года серию роботизированных самосвалов составляли Cat 789D, Cat 793F и Cat 797F грузоподъемностью 181, 227 и 363 т соответственно. Эти автономные самосвалы предоставляют постоянную телеметрию, самостоятельно реагируют на вызовы, поступающие от экскаватора, и перевозят породу к месту разгрузки. В ноябре 2018 года компания Caterpillar сообщила, что ее автономные карьерные самосвалы, оснащенные системой Cat Command, перевезли 1 млрд т горной массы.

Компания Komatsu использует более 130 роботизированных самосвалов, оснащенных автоматической транспортной системой (Autonomous Haulage Systems – AHS), перевозящих разные грузы на шести горных предприятиях в Австралии, Северной и Южной Америке. К 2018 г. роботизированные самосвалы AHS компании Komatsu перевезли более 2 млрд т горной массы и руды.

Еще в 2010 г. компания Rio Tinto создала диспетчерский центр, который удаленно контролирует 4 морских порта, 15 рудников и 43 же-

лезнодорожных состава¹. Сегодня компания Rio Tinto использует более сотни роботизированных самосвалов AHS на своих рудниках Yandicoogina и Nammuldi. Эти машины могут практически самостоятельно маневрировать по рудникам, поскольку маршрут движения заложен в их навигационную систему. Управление самосвалами осуществляется операторами из центра в Перте, находящемся в 1200 км от места добычи. В настоящее время – это пример наиболее комплексного применения автономной технологии.

Автономные самосвалы Volvo FH (в количестве 6 шт.) транспортируют известняк из карьера норвежской горнодобывающей компании Børnøy Kalk AS в близлежащий порт на участке длиной 5 км, включающем туннели. В течение 2018 года проходила тестовая эксплуатация этого проекта, а в конце 2019 года он перешел в режим коммерческой эксплуатации².

В 2016 году компании Komatsu, Volvo и Scania представили автономные карьерные самосвалы без кабины водителя, которого заменил центральный контроллер. Это позволило изменить компоновку и эргономику машины³ (рис. 1).

Основным отличием данных машин является их способность двигаться вперед и назад с равной скоростью, полный привод и управление, как вращением всеми четырьмя колесами, так и поворотом. Вследствие этого, уменьшается время на постановку машины под погрузку и разгрузку. Поскольку отсутствует необходимость в развороте автомобиля, то экономится место в призабойной и разгрузочной зонах (требуется минимум вскрышных работ). Кроме того, самосвал Komatsu IAHV способен двигаться «крабовым ходом».

Крупнейшая канадская нефтедобывающая компания Suncor Energy, после испытания автономных самосвалов на песчаных полях Альберты (Австралия), в 2015 году закупила 175 беспилотных машин Komatsu.

В начале 2019 года Китай представил свой автономный карьерный самосвал грузоподъемностью 110 т, рассчитанный на круглосуточную работу. Погрузка и разгрузка самосвала также осуществляются автономно. Первые самосвалы были запущены в эксплуатацию в конце 2019 г.

Тестирование своих решений компания Inner Mongolia North Heavy Industries Group Co., Ltd. провела в Объединенных Арабских Эмиратах.

ПАО «БЕЛАЗ» (Белоруссия) совместно с компанией «ВИСТ Групп» (Россия) представили беспилотный самосвал БелАЗ-7513R, который самостоятельно спускается в карьер и поднимается отсюда с грузом (рис. 2). БелАЗ-7513R может работать в трех режимах: традиционном (оператор-водитель управляет машиной из кабины самосвала), дистанционном (оператор управляет машиной с удаленного рабочего места) и автономном (оператор удаленно только контролирует бортовую систему) [7, 8]. Два роботизированных самосвала БЕЛАЗ-7513R грузоподъемностью 136 т уже работают на разрезе Абаканский (горнопромышленный холдинг ОАО «СУЭК») в Хакасии.

В июле 2018 года на полигоне БелАЗа (Жодино – Белоруссия) успешно испытали автономный фронтальный погрузчик БелАЗ-78250, управление которого осуществлялось оператором, находящимся на удалении 2500 км (в Екатеринбурге).

Фирма Built Robotics (Калифорния) разработала мини-погрузчик Bobcat, который может двигаться по рабочей площадке, преодолевая или объезжая препятствия, а также разрабатывать котлован заданных геометрических размеров. При приближении людей к погрузчику машина временно останавливается.

В 2015 году компания Rio Tinto провела испытания роботов-бурильщиков, подготавливающих скважины для закладки взрывчатки. Это автоматизированные буровые станки SKF и SKSS с расширителями скважин и погрузными пневмударниками, оборудованные датчиками GPS-позиционирования и комплексом передачи телеметрии [1, 3]. После выбора площадки для проведения работ оператором и получения соответствующей команды робот загружает взрывчатку, собирает данные с участка и передает их в диспетчерский пункт. Ожидается, что в перспективе эти роботы смогут бурить вертикальные скважины с точностью до миллиметра [9].

Компании Sandvik (Амстердам), Flanders Electric (штат Индиана) и Нидерланды являются партнерами по автоматизации буровых установок для разработки скважин. Система Flanders Ardvac (усовершенствованное автоматическое радиоуправление с векторным вращением сверла) точно позиционирует и выравнивает буровую установку, сверлит до желаемой глубины, стягивает долото и сбрасывает домкраты при подготовке к следующему движению. Она также

¹ Rio Tinto opens automated Pilbara Operations Centre. <https://www.australianmining.com.au/news/rio-tinto-opens-automated-pilbara-operations-centre>

² <https://venturebeat.com/2018/11/20/volvos-first-commercial-self-driving-trucks-will-be-used-in-mining/>

³ <https://www.distrelec.de/current/en/robotics/how-robots-are-changing-the-mining-sector>

контролирует окружающую территорию на наличие препятствий с помощью системы 3D-визуализации для обеспечения безопасной работы машины.

Представители компании отмечают, что автоматизация повышает производительность на 30% за счет сокращения времени простоя оборудования, поскольку обычные буровые установки, управляемые человеком, должны отключаться во время проведения взрывных работ и смены оператора.

Компания Atlas Copco в 2017 г., после проведения двухлетних испытаний в Австралии, перевела 18 буровых установок Pit Viper 271 в беспилотный режим работы. Эти буровые установки, оснащенные системой автоматизированного

бурения Atlas (ADS), в состоянии пробурить скважину глубиной 14 м в поисках железной руды. Используя системы GPS и обнаружения препятствий, буровые установки могут проверять состояние грунта, обеспечивать обратную связь, передвигаться независимо друг от друга и бурить с высокой точностью под контролем удаленного оператора. При этом один оператор может одновременно управлять тремя установками. Автономные установки Pit Viper 271 могут работать 11,5 ч при 12-часовой смене по сравнению с 8,5 ч для людей [2, 3, 9, 10].

Французская фирма Montabert также разработала роботизированную бурильную установку «Robofog», которая проводит бурение шпуров по заданной программе.



a



б

Рис. 1. Роботизированные самосвалы: *a* – Komatsu и *б* – Volvo

Fig. 1. Robotic mining truck: *a* is Komatsu and *b* is Volvo



Рис. 2. Фронтальный погрузчик БелАЗ-78250 грузоподъемностью 22 т и карьерный самосвал БЕЛАЗ-7513Р

Fig. 2. 22 t front-end loader BelAZ-78250 and mining truck BelAZ-7513R



Рис. 3. Демонтажные серийные роботы

Fig.3. Disassembling commercial robots

Одна из крупнейших в мире горнодобывающих компаний BHP Billiton начала применять автономные самосвалы и буровые установки на своих железорудных шахтах (Австралия), а также на месторождениях нефтеносных песков в Альберте (Канада).

Компания KUKA Roboter (Германия) использует автоматизированный манипулятор для установки арочных крепей. Фирма NitroNobelMec (Швеция) разработала мобильные манипуляторы EG-33 и HF-51 с дистанционным управлением для закладки взрывчатых веществ в скважины. Компания BrokkAB (Швеция) и TopTec (Германия) выпустили роботов, способных работать в ограниченном пространстве. Но роботы фирмы BrokkAB могут производить обorkу заколов, дробление негабарита и бурение скважин в шахтах. Эти роботы (рис. 3) оснащены маневренным манипулятором, имеющим диапазон оборота от 270 до 360°, что позволяет производить работы в различных пространственных положениях, например горизонтальное бурение [3].

Полуавтономная система Caterpillar MINEGEM разработана для подземных горных работ. Производительность самосвала с системой MINEGEM, работающей дистанционно, существенно выше, чем у систем прямой видимости или телеуправляемых систем, поскольку в этом случае оператору не нужно перемещаться с поверхности на машину. Если машина выходит за пределы рабочей зоны или другая машина (персонал) входит в эту зону, то система MINEGEM останавливает оборудование. Данная система позволяет оператору работать в удаленном, безопасном и эргономичном рабочем месте, как на поверхности, так и под землей.

Система AutoMine от Sandvik может быть объединена со SCADA и системами планирова-

ния производства для лучшей совместимости с процессами и системой управления операциями подземных горных работ. AutoMine обеспечивает постоянную работу в течение смены; уменьшение затрат на техническое обслуживание за счет снижения ущерба и отсутствия перерывов в работе оборудования; увеличение производительности за счет контроля производственных процессов и мониторинга в реальном времени; уменьшение эксплуатационных расходов за счет снижения численности рабочего персонала.

Компания Leica Geosystems Mining, (Брисбен, Австралия) и компания «Автономные решения» (Мендон, штат Юта) сотрудничают в нескольких независимых от производителей автономных системах управления горными машинами. Например, Leica J 3 dozor autoip – это полностью автономная система контроля гусеничных и колесных бульдозеров. Беспилотные бульдозеры могут очистить и подготовить заранее заданную область и автоматически остановиться, когда работа будет завершена.

Применение робототехники в горнодобывающей промышленности уже достаточно широко и включает роботизированное дозирование, выемку грунта и транспортировку, роботизированное картирование и геодезию, а также роботизированное бурение и обработку взрывчатых веществ. В настоящее время на рынке доступны следующие автоматизированные технические средства для горной промышленности:

- самосвалы;
- погрузочно-разгрузочная техника;
- буровые установки.

Преимущества автономии

Роботизированные системы предлагают горнодобывающим компаниям ряд явных преимуществ

ществ. Первым является повышение безопасности при добыче полезных ископаемых за счет вывода человека из зоны ведения горных работ, т. е. из потенциально опасной зоны.

Горное дело весьма травмоопасно. Даже посадка и выход из кабины карьерного самосвала означает подъем (спуск) по 6-метровой лестнице, часто покрытой льдом или грязью. Вследствие однообразной работы водители утомляются или засыпают, что может привести к столкновению или съезду с дороги. Роботизация устраняет эти факторы, позволяя самосвалам точно ориентироваться на дороге, отслеживать другие транспортные средства и следовать за ними на безопасном расстоянии, обнаруживая препятствия. Движение каждого автономного карьерного самосвала к месту погрузки или разгрузки обеспечивается системой спутниковой навигации GPS. Использование лидаров, радаров, ультразвуковых датчиков и оптико-электронной системы обеспечивает точность позиционирования самосвала до 1 см. Система управления технологическим транспортом исключает возможность столкновения с обычными транспортными средствами, управляемыми водителями, в той же рабочей зоне. Если человек или другое транспортное средство окажутся вблизи от беспилотного самосвала при его движении, то датчик препятствий активируется, и самосвал останавливается в аварийном режиме. Для повышения безопасности используется ряд систем [1–3, 8, 10–12].

CDS – (система обнаружения столкновений): формирует «защитную оболочку», окружающую автомобиль. Когда границы цифровых пузырьков пересекаются – CDS подает предупреждение.

ODS – (система обнаружения препятствий): при обнаружении препятствий система остановит самосвал с АНС.

ESB – (кнопка аварийного останова): эта система останавливает все беспилотные машины, находящиеся в эксплуатации и управляемые системой Front Runner. Центральный контроль, все автономные и пилотируемые транспортные средства в системе Front Runner оснащены системой ESB.

Вся информация поступает в центральный компьютер диспетчерского пункта. Компьютер направляет самосвал к определенному экскаватору. После того как самосвал загружен, он движется к заданной точке разгрузки. Компьютер считывает навигационную систему самосвала и выбирает лучший маршрут от А до Б, заменяя работу водителя. Каждое место разгрузки записывается, чтобы две разгрузки не сбрасывались в одну кучу.

Если нет возможности выполнить проверку состояния канала связи и передачи данных, машина также сразу останавливается. Эти системы и устройства обеспечивают безопасность движения автономных транспортных средств в любое время суток и в различных погодноклиматических условиях.

Можно отметить, что современная горнодобывающая промышленность по информационному обеспечению мало уступает космическим программам. Например, первый космический челнок имел меньшую вычислительную мощность, чем карьерный самосвал Caterpillar 797.

Второе преимущество – повышение производительности. Автономные самосвалы исключают непроизводительные простои, например, при замене экипажей обычных машин или перерыве на обед. Устранение перерывов, времени на проветривание карьеров после проведения взрывных работ и загазованности рабочей атмосферы на глубоких горизонтах позволяет автономным карьерным самосвалам работать дополнительно еще два-четыре часа в день. Робот не болеет, не устает, не раздражается, у него не бывает плохого настроения, его внимание нельзя отвлечь. Роботизированные самосвалы могут повторять маршрут движения с точностью до нескольких сантиметров все время рабочего цикла. Это позволяет уменьшить ширину технологических дорог или даже перейти к однополосной схеме движения при условии создания требуемого числа «карманов» по маршруту движения для развязки автономных самосвалов [13].

Роботизированные самосвалы могут останавливаться в нескольких сантиметрах от заданного места, например, прямо под ковшем экскаватора, раз за разом, что сокращает время погрузки. Точный контроль скорости и маршрута самосвала обеспечивает работу машины в соответствии с заводскими спецификациями, экономии топлива, повышает срок службы шин и деталей, межремонтный период и время эксплуатации.

Кроме того, использование беспилотных машин позволяет устранить многие психологические факторы, связанные с управлением карьерными самосвалами, например при движении на крутых подъемах и спусках (уклонах) технологических дорог. Тогда единственным ограничением на величину углов уклонов дорог остается усилие сцепления колес (гусениц) внедорожной техники с покрытием дороги. Интеллектуальные системы способны заменить водителя в трудных ситуациях: на серпантинных горных разработках, особенно после дождя и снега [10, 11].

Все это обеспечивает увеличение добычи на предприятии или уменьшение автопарка.

Третье преимущество – уменьшение затрат. При разработке месторождений в отдаленных регионах возникает проблема привлечения квалифицированных кадров. Водители должны выдерживать условия скуки и изоляции, изнурительных условий (большие глубины или высоты, арктический холод или зной пустыни). Использование автоматизированных самосвалов в рамках единой оперативно-диспетчерской системы позволяет частично решить эту проблему за счет сокращения штата водителей и расходов на инфраструктуру для персонала.

Применение автономного автотранспорта обеспечивает сокращение расхода топлива на 10 до 15%; износа шин на 5–15% и расходов на техническое обслуживание на 8%. В то же время повышается производительность на 15–20% и коэффициент использования самосвала на 10–12% [1–3, 8, 10–12].

Применение автономной техники также может помочь привлечь квалифицированных специалистов, которые ранее даже бы не задумывались о работе в горной промышленности. Для разработки, запуска и обслуживания роботизированной техники необходимо новое поколение специалистов, которые выросли на видеоиграх, компьютерах и Интернете.

Возможно, что самое большое преимущество автоматизации заключается в том, что с автономным оборудованием производительность контролируема и стабильна.

Сопоставление затрат

По сравнению с традиционным горнотранспортным оборудованием затраты на автономную технику безусловно выше. Однако достаточное количество требуемой инфраструктуры (например, GPS и сети связи) уже имеется практически на любом крупном горнодобывающем предприятии.

При сравнении затрат следует учитывать, что обслуживание обычных карьерных самосвалов, стоимость которых составляет до 6 млн долларов США, является весьма дорогостоящим. В отчете, опубликованном деловым изданием «The Australian», отмечается, что расходы на содержание обычного карьерного самосвала на удаленных объектах составляют один или более миллиона долларов в год. Сюда входит зарплата водителя, составляющая до 120 000 долларов в год. А чтобы каждый самосвал работал круглогодично, необходимо четыре водителя. К этому

следует добавить затраты на питание, жилье, обучение, медицинское обслуживание и вахтовую доставку сменного персонала в труднодоступные районы. И тогда затраты легко превысят отметку в миллион долларов.

С другой стороны, сокращение объемов технического обслуживания автономной техники, только за счет увеличения срока службы шин на 5–15%, уже обеспечивает существенную экономию. Шины карьерного самосвала могут стоить до 40 000 долларов за штуку. При крупном автопарке обеспечивается заметная экономия [3, 10, 11].

Если учитывать повышение производительности наряду со снижением трудовых и эксплуатационных затрат, то роботизация может добавить не один миллион к итоговой прибыли. Кроме того, роботизация обеспечивает значительное повышение безопасности людей при таких работах, как закладка взрывчатых веществ, перемещение под землей после добычи или разработку месторождений в местах, где люди не могут работать.

Минусы и проблемы

Анализ существующих систем автоматизации горных работ и тенденций развития технологий управления показывает, что автономные транспортные средства будут применяться все в более широких масштабах, а это может в корне изменить наше представление о добыче и транспортировке горной массы. Применение робототехники в горнодобывающей промышленности предъявляет особые требования к их надежности и качеству, порождает многочисленные проблемы и нерешенные вопросы, которые должны быть совместно определены и решены как научными кругами, так и промышленностью.

Минусы автоматизации во всех отраслях практически одинаковы.

1. Обучение персонала. Хотя автономные технологии развиваются, управляемые человеком машины будут продолжать работать наряду с роботизированными транспортными средствами. Беспилотные автотранспортные средства работают по четким логическим правилам, которые для людей могут быть неочевидны. Автономные перевозки требуют новых навыков работы по сравнению с пилотируемыми операциями.

2. Довольно распространено заблуждение в том, что человека можно просто заменить машиной. Технически это намного более сложная задача. Сразу возникает много вопросов: например, изменятся ли требования к качеству и содержанию дорог; нужно ли перепроектировать

перекрестки; нужно ли иметь одинаковое количество топливных дней и т. д.

3. Вопросы права. Технология ведения горных работ подчиняется четким нормативам, которые определяют специфику перевозки горной массы самосвалами под управлением водителей. Пока не ясно, каковы должны быть юридические требования и нормы для эксплуатации новой техники. На данный момент пробелы в законодательстве не позволяют эксплуатировать беспилотную технику в определенных условиях, например, при пересечении технологических трасс с дорогами общего пользования, и тогда управление над роботом-самосвалом берёт на себя оператор.

4. Крупные горнодобывающие корпорации все активнее внедряют автономные самосвалы, что уменьшает эксплуатационные расходы, повышает эффективность и безопасность транспортирования больших объемов горной массы и конкурентоспособность на рынке. Но любая компьютеризация привносит программную уязвимость и угрозу взлома системы.

5. Разработчики автономных систем предлагают различные системы мониторинга для отслеживания состояния основных подсистем и предупреждения о необходимости проведения технического обслуживания. Однако без человека-водителя некоторые образующиеся неисправности могут остаться просто незамеченными. Люди интуитивно ощущают окружение так, как пока еще не может современная робототехника, поскольку невозможно все предусмотреть алгоритмом. Например, необходима визуальная проверка безопасности таких операций, как заправка.

6. В случае массового внедрения автономных систем получим увеличение технической безработицы.

И тогда возникает вопрос: действительно ли внедрение автономной технологии того стоит?

Будущие разработки роботизированного оборудования

Роботизацию добычи начали рассматривать еще в 70-х годах прошлого века. Но потребовались различные технологические разработки и технические достижения, позволившие уменьшить стоимость необходимого оборудования. Это, например, высокоскоростные сети беспроводной связи, GPS-навигация, ультразвуковые, радиолокационные, лазерные и другие датчики, позволяющие обнаруживать близлежащие движущиеся и неподвижные объекты. За прошедший период были также достигнуты значительные успехи в алгоритмах управления, скоростях

обработки информации и электронике. Задача сегодняшнего дня заключается в том, чтобы поднять автоматизированное управление на уровень, соответствующий 70 % уровня квалифицированного оператора. Существующее программное обеспечение пока еще не справляется с динамически изменяющимися условиями, поэтому разрабатывается улучшение сети управления на основе решения сложных задач поведения в постоянно меняющейся среде.

Обычно выделяют четыре уровня развития данного направления.

Первый уровень – машина находится в прямой видимости, но влиять на траекторию её движения можно только с помощью пульта.

Второй уровень основан на системе управления по телеметрическим данным. Машина движется по выработке – карьеру, руднику или шахте вне пределов прямой видимости и выполняет заданную работу по радиокомандам оператора, который получает необходимую информацию от датчиков и камер.

Третий уровень – один оператор контролирует деятельность нескольких единиц техники, которые работают согласно заданной программе и, если необходимо, вносит соответствующие корректировки.

Четвёртый уровень – полная автоматизация, то есть техника работает совершенно самостоятельно. При этом все данные передаются в пункт управления, а оператор только контролирует автономные машины и, без необходимости, не вмешивается в их работу.

Примером автоматизации второго уровня может быть рудник «Удачный» (АЛРОСА). На выработке работает ПДМ, а оператор управляет ею на специальной площадке. Наиболее продвинутым в области автоматизации горного предприятия в мировом масштабе считается австралийско-британский концерн Rio Tinto, представляющий третий уровень автоматизации. Оборудование снабжено датчиками, работает в соответствии с алгоритмом и программами, а операторы контролируют его работу, находясь на расстоянии нескольких километров. Автономные самосвалы самостоятельно загружаются, транспортируют горную массу в нужное место и также самостоятельно разгружаются [14].

Дальнейшее развитие автоматизации производства в проекте Rio Tinto «Рудник будущего» направлено на то, чтобы роботы самостоятельно вели взрывные работы, бурили шахты, добывали и сортировали руду, отделили отходы. Затем автоматические поезда и самосвалы будут самостоятельно транспортировать сырье на обогати-

тельные и перерабатывающие предприятия. При этом вся техника, используемая в производстве, будет дистанционно управляться из Перта.

В настоящее время, в основном, проводится модернизация выпускаемых моделей, но в ближайшем будущем будут производиться самосвалы, изначально спроектированные как беспилотные. Например, все новые модели самосвалов Komatsu грузоподъемностью 300 т и более разрабатываются с учётом возможности переоборудования в автономный вариант. Легче автоматизировать электрифицированное оборудование, в том числе и транспортные средства [15].

Значительные результаты и достижения, в основном, отмечаются в зарубежных добывающих компаниях. Россия, можно сказать, пока еще находится в начале пути роботизации, когда наиболее значимые решения еще соответствуют первому уровню, но уже есть прецеденты и более существенных достижений. Российские промышленности все еще воспринимают беспилотную технику как новинку. Эта технология пока не получила распространения в России вследствие ряда причин технического и экономического характера, а также особенностей государственного регулирования. Поэтому общее число мощной внедорожной автономной техники в России пока небольшое. Кроме того, существует ещё одна значительная проблема: в России не выпускается соответствующее оборудование, поэтому требуемые компоненты приходится закупать за рубежом.

В то же время правительством РФ разработана многолетняя комплексная программа – «Национальная технологическая инициатива». На горных предприятиях России и стран СНГ с 1999 г. внедряется система оперативно-диспетчерского управления горнотранспортного комплекса «Карьер», которая разработана совместно ПАО «БелАЗ» и компаний «Вист Групп». На основе данной системы разрабатывается более современная автоматизированная (в перспективе роботизированная) система управления «Интеллектуальный карьер», которая должна существенно повысить уровень безопасности и производительности горных работ [13, 16].

Внедрение современных АСУ горнотранспортным комплексом предприятия, таких как, например, система «Иртыш», позволяет обеспечить надежное и четкое управление технологическим процессом добычи и транспортировки горной массы. Это проявляется в повышении безопасности проводимых работ, а также эффективности производства за счет снижения себестоимости продукции [17].

Однако в настоящее время ситуация в российской горной промышленности такова, что минусы преобладают над плюсами. Основными из них являются значительные финансовые вложения, не гарантирующие мгновенных дивидендов.

Заключение

Основная причина востребованности автономной техники – увеличение доли месторождений, находящихся в сложных горно-технологических условиях, длительный срок подготовки специалистов, значительная нехватка квалифицированных водителей карьерных самосвалов по всему миру и быстрая выработка человеческого ресурса на такой тяжелой работе.

То, что началось как отдаленное видение всего несколько десятилетий назад, быстро становится реальностью. Роботы становятся дешевле, гибче и автономнее, в том числе благодаря искусственному интеллекту. Некоторые роботы заменяют людей-работников; другие – работают вместе с рабочими, дополняя их. Экономическая выгода от применения роботизированной техники при разработке месторождений достаточно наглядна, а ее использование в карьерах и шахтах уже является обычным делом. Значительная эффективность этих решений подтверждается мировым опытом эксплуатации автономного оборудования.

Горнодобывающая промышленность имеет большой потенциал для автоматизации, с применением которой появляется возможность для оптимизации, поскольку становится доступно больше информации, а действия могут многократно повторяться с высокой точностью. Оптимизация технологического процесса разработки месторождений при переходе от механизации к автоматизации и роботизации создает новые возможности повышения эффективности производства и снижения затрат. Это задача значительно более высокого уровня сложности по сравнению с отдельной задачей автоматизации горных машин и оборудования.

С развитием технологий горные роботы смогут также разрабатывать месторождения в глубинах мирового океана, где низкая видимость и высокое давление делают работу для человека опасной или невозможной. Также роботы смогут вести добычу минералов на астероидах.

Поэтому для успешной и эффективной работы горнодобывающих компаний весьма важно учитывать роль роботов в технологии сегодняшнего дня и роль, которую они будут играть завтра. Внедрение такого оборудования может быть рекомендовано в качестве одного из ключевых

направлений технического перевооружения горнодобывающих предприятий. Широкое применение роботизированной техники на открытых и подземных горных работах может привести к существенным изменениям при проектировании

карьеров, шахт и правил безопасности, а также способствовать разработке новых видов горных машин и оборудования, что обеспечит значительное повышение эффективности добычи полезных ископаемых.

Список литературы

1. Atkinson R. D., 2019, Robotics and the Future of Production and Work. – Information Technology and Innovation Foundation.
2. Dadhich S., Bodin U., Andersson U., 2016, Key challenges in au-tomation of earth-moving machines, *Automation in Construction*, 68, 212–222. doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.009
3. Marshall J. A., Bonchis A., Nebot E., Scheding S. Robotics in mining //Springer handbook of robotics. Springer, Cham, 2016; 1549–1576. doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1_59
4. Kachuri L., Villeneuve P. J., Parent M.-E., Johnson K. C., 2016, Workplace exposure to diesel and gaso-line engine exhausts and the risk of colorectal cancer in Canadian men. *Environmental Health*, 15, 1, 4–16. doi.org/10.1186/s12940-016-0088-1
5. Taxell P., Santonen T., 2017, Diesel engine exhaust: basis for occupational exposure limit value. *Toxi-cological Sciences*, 158, 2, 243–251. doi.org/10.1093/toxsci/kfx110
6. Трубецкой К. Н., Рыльникова М. В., Владимиров Д. Я. От системы «карьер» к новому интеллектуальному укладу открытых горных работ// Проблемы недропользования. 2019. № 3(22). С. 39–48. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.03.039
7. Гучек Е. М., Клебанов Д. А. График 24/7 и без нервов // Уголь Кузбасса. 2018. № 1. С. 20–23.
8. Бигель Н. В. Преимущества и возможности роботизированного карьерного самосвала грузоподъемностью 130 тонн // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № S38. С. 53–57. doi: 10.25018/0236-1493-2017-12-38-53-57
9. Хакулов В. А., Хакулов В. В. Экскаваторы роботизированных открытых разработок будущего // Горное дело. 2016. №3(9). С. 35–42.
10. Burgard W., Franke U., Enzweiler M., Trivedi M. The mobile revo-lution-machine intelligence for autonomous vehicles (Dagstuhl Seminar 15462) // Dagstuhl Reports. – Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik, 2016. Vol. 5. No. 11. doi: 10.4230/DagRep.5.11.62
11. Gölbaşı O., Dagdelen K. Equipment Replacement Analysis of Manual Trucks with Autonomous Truck Technology in Open Pit Mines, Conference Paper (PDF Available), August 2017.
12. Schoettle B., Sivak M. Potential Improvements in Safety and Efficiency with Autonomous Trucking. 2017, no. SWT-2017-19.
13. Владимиров Д. Я. Интеллектуальный карьер: Эволюция или революция? //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. №. S1-1. С.77–82.
14. Кучумова А. Без человека в кабине // Добывающая промышленность. 2019. №2 (14). С. 92–96.
15. Хазин М. Л., Штыков С. О. Карьерный электрифицированный транспорт // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №1. С. 11–18. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-11-18>
16. Шевкун Е. Б., Казаков Е. А. Роботизированные системы автомобильного транспорта на открытых горных работах // Ученые заметки ТОГУ. Электронное научное издание. 2017. Т. 8. № 4. С. 460–472.
17. Маргарян С.А. Автоматизированная система оперативно-диспетчерского управления горнотранспортным комплексом «Иртыш» // Горная промышленность. 2017. №4 (134). С. 72–74.

Поступила 10.02.2020; принята к публикации 02.03.2020; опубликована 25.03.2020

Хазин Марк Леонтьевич – д-р техн. наук, профессор, Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия. E-mail: Khasin@ursmu.ru

References

1. Atkinson R.D. Robotics and the future of production and work. Information Technology and Innovation Foundation (2019).
2. Dadhich S., Bodin U., Andersson U. Key challenges in automation of earth-moving machines. *Automation in Construction*. 2016, 68, 212–222. doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.009
3. Marshall J.A., Bonchis A., Nebot E., Scheding S. Robotics in mining. Springer handbook of robotics. Springer, Cham, 2016; 1549–1576. doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1_59
4. Kachuri L., Villeneuve P.J., Parent M.-E., Johnson K.C. Workplace exposure to diesel and gasoline engine exhausts and the risk of colorectal cancer in Canadian men. *Environmental Health*. 2016, 15, 1, 4–16. doi.org/10.1186/s12940-016-0088-1

5. Taxell P., Santonen T. Diesel engine exhaust: basis for occupational exposure limit value. *Toxicological Sciences*. 2017, 158, 2, 243–251. doi.org/10.1093/toxsci/kfx110
6. Trubetskoy K.N., Rynnikova M.V., Vladimirov D.Ya. From the system “pit” to the new intellectual structure of open cast mining. *Problemy nedropolzovaniya* [Subsoil Use Issues]. 2019, no. 3(22), pp. 39–48. doi: 10.25635/2313-1586.2019.03.039
7. Guchek E.M., Klebanov D.A. 24/7 and no stress. *Ugol Kuzbassa* [Kuzbass Coal], 2018, no. 1, pp. 20–23. (In Russ.)
8. Bigel N.V. Advantages and capabilities of a robotic mining truck with a carrying capacity of 130 tons. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2017, no. S38, pp. 53–57. doi: 10.25018/0236-1493-2017-12-38-53-57
9. Khakulov V.A., Khakulov V.V. Excavators of robotic open-cast mining of the future. *Gornoe delo* [Mining engineering], 2016, no. 3(9), pp. 35–42. (In Russ.)
10. Burgard W., Franke U., Enzweiler M., Trivedi M. The mobile revolution-machine intelligence for autonomous vehicles (Dagstuhl Seminar 15462). Dagstuhl Reports. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum fuer Informatik. 2016, vol. 5, no. 11. doi: 10.4230/DagRep.5.11.62
11. Gölbaşı O., Dagdelen K. Equipment replacement analysis of manual trucks with autonomous truck technology in open pit mines. Conference Paper (PDF Available), August 2017.
12. Schoettle B., Sivak M. Potential improvements in safety and efficiency with autonomous trucking. 2017, no. SWT-2017-19.
13. Vladimirov D.Ya. Intelligent open pit mine: evolution or revolution? *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2015, no. S1-1, pp. 77–82. (In Russ.)
14. Kuchumova A. Without a man in the cabin. *Dobyvayushchaya promyshlennost* [Mining industry], 2019, no. 2 (14), pp. 92–96. (In Russ.)
15. Khazin M.L., Shtykov S.O. Electric mining trucks. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol.16, no.1, pp. 11–18. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-1-11-18>
16. Shevkun E.B., Kazakov E.A. Robotic systems road transport in open-pit mining. *Uchenye zametki TOGU. Elektronnoe nauchnoe izdanie* [Scientific notes of PNU. Electronic scientific journal], 2017, vol. 8, no. 4, pp. 460–472. (In Russ.)
17. Margaryan S.A. An automated dispatch control system of the Irtysh mining transport complex. *Gornaya promyshlennost* [Mining industry], 2017, no.4 (134), pp. 72–74. (In Russ.)

Submitted 10/02/2020; revised 02/03/2020; published 25/03/2020

Mark L. Khazin – DrSc (Eng.), Professor
Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia. E-mail: Khasin@ursmu.ru