Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-124-130

Автоматизация и роботизация горного производства – современный этап перехода к высокопроизводительному и безопасному ведению открытых горных работ

В.С. Коваленко ✉, И.В. Зырянов
Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация
✉ Kovalenko_v@ipkonran.ru

Резюме: Развитие открытого способа разработки месторождений твердых полезных ископаемых в будущем неразрывно будет связано с повышением производительности труда и уровнем его безопасности. Эта задача может быть решена за счет преобразования горного производства в новый технологический уклад с широким применением роботизированной техники на добычных и транспортных работах. В статье проанализировано современное состояние, перспективы и роль робототехники в повышении эффективности и безопасности открытых горных работ. В настоящее время области применения робототехники на карьерах в основном ограничиваются буровыми и транспортными работами. Необходимо автоматизировать экскаваторы, которые являются головными машинами в горнотранспортных комплексах оборудования карьеров. Внедрение робототехники порождает многие проблемы и нерешенные вопросы как технического, так и технологического порядка, для решения которых должен быть задействован научный потенциал многих коллективов. Это должно привести к существенным изменениям в проектировании горнотехнических систем, правилах безопасности ведения горных работ и созданию новых видов высокоавтоматизированной горнотранспортной техники, в том числе наделенных искусственным интеллектом.

Ключевые слова: горное дело, полезные ископаемые, карьеры, роботизированная техника, транспортные системы, проектирование горнотехнических систем

Для цитирования: Коваленко В.С., Зырянов И.В. Автоматизация и роботизация горного производства – современный этап перехода к высокопроизводительному и безопасному ведению открытых горных работ. *Горная промышленность.* 2025;(5):124–130. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-124-130

Automation and robotization of mining production: the current stage of transition to high-performance and safe surface mining

V.S. Kovalenko ✉, I.V. Zyryanov
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
✉ Kovalenko_v@ipkonran.ru

Abstract: The future development of the surface mining of solid minerals will be inseparably linked to increasing labor productivity and safety levels. This task can be addressed by transforming mining production into a new technological mode with the widespread use of robotic equipment in the production and haulage operations. The article analyses the current state, prospects and role of the robotic equipment in improving the efficiency and safety of surface mining operations. At present, application of robotic equipment in the open-pit mines is mainly limited to drilling and hauling operations. It is necessary to automate excavators, which are the main machines in the mining transport systems of the open-pit mines. Introduction of robotic equipment raises many challenges and unresolved issues, both technical and technological, which require the research potential of many teams to be engaged in order to address them. This should result in significant changes in designing of mining systems, in the safety rules for mining operations, and create new types of highly automated mining and haulage equipment, including those fitted with the Artificial Intelligence solutions.

Keywords: mining, useful minerals, open-pit mines, robotic equipment, haulage systems, designing of mining systems

For citation: Panfilov S.Yu., Tikhonov V.A., Dudnik G.A., Gadzhiev G.G., Melnikov N.O., Akinin N.I. Automation and robotization of mining production: the current stage of transition to high-performance and safe surface mining. *Russian Mining Industry.* 2025;(5):124–130. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-124-130

Введение

Генеральное направление технической политики в развитии горнодобывающей промышленности России заключается в преимущественном применении открытого способа разработки твердых полезных ископаемых как наиболее эффективного и безопасного. Для сохранения лидирующего положения открытый способ разработки должен находиться в тренде мирового развития горнодобывающих отраслей, в основу которого в настоящее время положен курс на переход к роботизированной горной технике и безлюдным технологиям добычи различных полезных ископаемых. Многочисленными научными работами российских и зарубежных ученых, а также мировой и отечественной практикой доказаны эффективность и производственная безопасность использования горнотранспортного оборудования с дистанционным и роботизированным управлением горных и транспортных машин на горных предприятиях. Они хорошо себя зарекомендовали при отработке опасных зон участков карьеров, ликвидации оползней и обрушений бортов, освоении запасов на глубоких горизонтах карьера, при эксплуатации карьеров в сложных климатических условиях, высокой загазованности атмосферы карьера, разработке горных пород с высокой степенью токсичности и радиоактивности и во многих других условиях, когда имеется опасность для технического персонала.

Значительные результаты и достижения отмечаются на крупных предприятиях Австралии, Канады, США, ЮАР, Южной Америки, Китая и других стран. В основном роботизация касается карьерного и магистрального транспорта, а также буровых станков. Имеется особый научный и практический интерес к роботизации экскаваторного парка, но пока нигде в мире это не реализовано в промышленном масштабе. Имеются лишь отдельные образцы роботизированных экскаваторов, в том числе наделенных искусственным интеллектом.

Россия находится в начале пути роботизации технологических процессов на карьерах. В настоящее время все внимание специалистов направлено на реализацию на практике проекта (системы) Интеллектуальный карьер, разработанного российскими учеными [1; 2]. Авторы данного проекта считают, что широкомасштабное использование роботизированной горной техники на открытых горных работах должно привести к существенным преобразованиям в проектировании карьеров и правилах безопасности, а также к созданию горной и транспортной техники с новыми качествами и параметрами. Однако применение роботизированных горнотехнических систем и безлюдных технологий добычи полезных ископаемых порождает многочисленные проблемы и задачи, которые должны быть разрешены как научными коллективами, так и многими отраслями промышленности.

Роль робототехники в повышении эффективности и безопасности открытых горных работ

Традиционные способы и методы открытой добычи полезных ископаемых имеют свои проблемы и ограничения, которые могут отчасти или даже полностью быть преодолены с помощью робототехники. Так, в настоящее время добыча полезных ископаемых часто ведется в сложных природных и горнотехнических условиях разработки месторождений, что может представлять опасность для работников. Робототехника позволяет избежать многих рисков для производственного персонала, так как роботы могут выполнять работы в крайне опасных условиях горного производства без присутствия человека.

Робототехника может сократить трудозатраты, так как позволяет использовать более производительные беспилотные автономные машины и эффективные способы ведения горных работ, а также снизить негативное техногенное воздействие на окружающую среду и природные ресурсы за счет экологизации технологических процессов, более точного и оперативного контроля за выбросами и сбросами загрязняющих веществ.

Кроме того, при применении робототехники открываются новые перспективы для добычи минеральных ресурсов на глубоких горизонтах карьеров. Это дает возможность расширить границы для открытого способа разработки. В качестве примера можно привести опыт использования горнотранспортного комплекса оборудования с дистанционным управлением на карьере «Удачный» [3–5]. Данная геотехнология сыграла ключевую роль в обеспечении безопасности работ в условиях высокой загазованности рабочего пространства, плохой видимости, производства частых взрывных работ на уступах в нижней зоне карьера в ограниченном технологическом пространстве. Использование инновационного оборудования, наряду с применением крутонаклонных транспортных съездов (до 240 промилле) обеспечило возможность формирования особой углубочной зоны в нижней части карьера, характеризуемой необходимой длиной активного фронта работ, крутыми углами откосов рабочих уступов (до 90°) и нерабочих бортов карьера в этой зоне. Все это позволило увеличить проектную глубину карьера и, соответственно, прирастить запасы руды в денежном выражении в пределах 200 млн долл. Аналогичные решения рекомендованы в проекты отработки других алмазорудных карьеров («Комсомольский», «Юбилейный», «Нюрбинский», Ботуобинский»).

Важным направлением дальнейшего совершенствования роботизированной геотехнологии является применение беспилотных систем основного оборудования, которые обладают высокой степенью автономности и независимости от оператора. Они оснащены системами искусственного интеллекта, что позволяет им принимать решения на основе собираемых данных и адаптироваться к сложному окружающему пространству. Благодаря этому они могут эффективно функционировать на опасных объектах горного предприятия. Они способны обработать большие объемы информации, которые помогут оптимизировать многие технологические процессы горного производства. Применение искусственного интеллекта и машинного обучения может существенно снизить вероятность возникновения аварий, прогнозируя потенциальные опасности, а также повысить эффективность освоения недр, минимизировать потери полезных ископаемых и повысить качество добываемого и перерабатываемого минерального сырья.

С дальнейшим совершенствованием роботизированных геотехнологий ожидается преобразование горного производства в новый технологический уклад. Причем главным объектом этого преобразования будет горнотранспортный комплекс карьера, для которого на всех этапах разработки месторождения должны быть созданы соответствующие технологические и организационные условия для его эффективного и безопасного функционирования. Также он может быть адаптирован к существующей горнотехнической системе в целях ее совершенствования по различным направлениям (технологическому, экономическому, экологическому). Для этого необходимы существенные изменения в научных основах и методологии проектирования карьеров, в нормативных документах и правилах безопасности ведения открытых горных работ. Не обойтись без налаживания серийного производства разнообразных инновационных образцов горнотранспортной техники с высокой степенью автоматизации рабочих процессов, в том числе наделенных искусственным интеллектом. Кроме того, все это потребует преобразований в подготовке кадров, изменения в сознании горнотехнического персонала и т.п.

Роботизированные транспортные системы

Одним из основных производственных процессов открытых горных работ, определяющих во многом эффективность и безопасность разработки месторождений, является перемещение карьерных грузов [6]. От вида применяемого транспорта зависят производственная мощность карьера, главные его параметры, конструкция и параметры бортов карьера, система разработки, система и схемы вскрытия рабочих горизонтов, структура комплексной механизации и многое другое. Карьерный транспорт является важнейшим связующим звеном между забоями в карьере и пунктами приема горной массы. От него напрямую зависит эффективность работы выемочно-погрузочного и отвального оборудования. В структуре себестоимости добычи многих полезных ископаемых на транспортирование карьерных грузов приходится порядка 45–50%, а в отдельных случаях до 60–70%. Карьерный транспорт среди других производственных процессов является наиболее трудозатратным и опасным для производственного персонала. Выявлено, что 25% происшествий со смертельным исходом на производстве случаются на этапе транспортировки руды [7]. Поэтому в мировой практике совершенствование карьерного транспорта находится в центре внимания не только горнодобывающих, но и других отраслей промышленности (машиностроительной, нефтехимической, электронной и др.). К решению этой важной проблемы активно подключился научный потенциал России, в том числе ИПКОН РАН.

Из аналитического обзора научных работ и практического мирового опыта следует, что во многих горнодобывающих странах роботизация транспортных машин на открытых горных работах принята в качестве главного направления повышения безопасности и эффективности добычи полезных ископаемых [8]. В этом направлении значительных успехов в роботизации транспортных машин достигли основные производители карьерных самосвалов – Caterpillar, Komatsu, Hitachi и др. В настоящее время количество роботизированных самосвалов, работающих в горной промышленности по всему миру, исчисляется тысячами. Роботизированные самосвалы только компании Komatsu перевезли более 4 млрд т горной массы на горнодобывающих предприятиях Австралии, Северной и Южной Америки [1].

Компании Komatsu, Volvo и Scania создали автономные карьерные самосвалы с новой компоновкой и эргономикой машины. Они способны двигаться вперед и назад с равной скоростью, имеют полный привод, автоматизированное управление и многие другие отличия от традиционных пилотируемых самосвалов. Вследствие этого уменьшается время на постановку машины под погрузку и разгрузку. Поскольку отсутствует необходимость в развороте автомобиля, уменьшается ширина рабочих площадок, что весьма важно для управления режимом горных работ, расконсервации временно нерабочих бортов карьера, ведения горных работ на крутых склонах гор и т.д.

ОАО «БЕЛАЗ» (Белоруссия) совместно с компанией «ВИСТ Групп» (Россия) представили беспилотный самосвал БелАЗ-7513R (грузоподъемностью 136 т), который может работать в трех режимах: традиционном (пилотируемом), дистанционном и автономном [9; 10].

Заслуживает внимания информация об интенсивном наращивании в Китае производства автономных карьерных самосвалов. Так, только на одном из угледобывающих предприятий запустили в эксплуатацию крупнейший в мире парк из 100 полностью автономных карьерных самосвалов. Все машины интегрированы в цифровую экосистему, которая объединяет возможности мобильной связи нового поколения – 5G-A, искусственного интеллекта и облачных платформ. Китайский машиностроительный комплекс вполне способен наладить серийное производство автономных самосвалов и автопоездов практически любой грузоподъемности, вытеснив тем самым других производителей с российского рынка. Такую ситуацию следует учитывать при проектировании и освоении новых месторождений Восточной Сибири, Якутии и Дальнего Востока, для которых весьма остро стоит проблема трудовых ресурсов. Усугубляют эту проблему не только малая плотность населения, но и его отток, нехватка квалифицированных специалистов, удаленность и слабое развитие инфраструктуры и многие другие причины, включая социальные и бытовые. Поэтому применение роботизированных самосвалов может частично решить дефицит кадров (водителей) и стать триггером для создания автоматизированного управления машинами смежных процессов с последующим переходом к безлюдным геотехнологиям, что весьма актуально для данных регионов страны.

Созданные и успешно испытанные самосвалы мировых фирм явились предтечей создания роботизированных систем карьерных грузоперевозок, которые обладают рядом явных преимуществ.

Во-первых, повышается безопасность за счет вывода человека из зоны ведения горных работ. 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 их столкновения, в том числе с обычными пилотируемыми транспортными средствами. Эти системы обеспечивают безопасность движения автономных транспортных средств в любое время суток и в различных погодно-климатических условиях.

Во-вторых, повышается производительность самосвала. Так как вся информация, исходящая от роботизированного самосвала, поступает в центральный компьютер диспетчерского пункта, то появляется возможность считывать навигационную систему самосвала и выбирать лучший маршрут его движения. Это касается определенных горнотехнических условий разработки, когда нет жесткой при-

1 The impact of AI on the mining sector. Available at: https://mine.nridigital.com/mine_oct24/impact-ai-mining-sector (accessed: 20.05.2025); Рябова С. Место под солнцем: зачем австралийские компании нанимают роботов Режим доступа: https://gmk.center/posts/mesto-pod-solntsem (дата обращения: 20.05.2025).

вязки к конкретному забою и карьерный транспорт работает по открытому графику.

По данным многих публикаций [7; 11–13] автономные самосвалы могут по сравнению с пилотируемым транспортом увеличить производительность грузоперевозок на 15–20%, уменьшить расход топлива на 10–15%, снизить износ автомобильных шин и увеличить соответственно их ходимость на 5–15%, сократить расходы на техническое обслуживание примерно на 8% и повысить коэффициент использования автомобилей на 10–20% по сравнению с лучшей практикой вождения пилотируемого автомобильного транспорта.

Важным отличием от традиционных транспортных систем является то, что роботизированные самосвалы могут повторять маршрут движения с точностью до нескольких сантиметров. В этой связи рекомендуют уменьшить ширину технологических дорог или даже перейти к однополосной схеме движения при условии создания требуемого числа «карманов» по маршруту движения для разъездов самосвалов. 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, что весьма актуально при разработке нагорных месторождений и сверхглубоких карьеров на этапе погашения горных работ.

Вызовы и препятствия для внедрения робототехники на открытых горных работах

Несмотря на потенциальные выгоды внедрение робототехники в добычу полезных ископаемых сталкивается с определенными вызовами и препятствиями. Широкому применению робототехники при открытой разработке месторождений в настоящее время препятствуют или усложняют его внедрение специфика и особенности существующей геотехнологии и механизации горных работ:

1) наличие большого числа различных видов горных работ и производственных процессов (бурение, заряжание, взрывание, вторичное дробление, погрузка, транспортировка, разгрузка, отвалообразование, складирование и т.д.), которые отличаются по функциональным операциям работы, их продолжительности и трудоемкости, требуют разных подходов к выбору их автоматизации;

2) постоянная изменчивость горно-геологических и горнотехнических условий разработки в процессе развития горных работ требует создания адаптивных роботизированных горнотехнических систем;

3) значительные размеры рабочей зоны карьера и их динамичное развитие, постоянное перемещение мест работы буровых станков, экскаваторов, карьерного транспорта, отвального и вспомогательного оборудования усложняют автоматизированное управление как отдельных роботизированных машин, так и всего комплекса оборудования карьера;

4) технологическая связь между смежными процессами горного производства требует соответствующей организационной перестройки работ и пересмотра основных параметров машин при выборе рациональных комплексов оборудования, включающих в свой состав роботизированных машин;

5) традиционно применяемые на действующих карьерах системы разработки, способы и схемы вскрытия рабочих горизонтов, а также параметры их элементов могут не соответствовать требованиям и условиям эффективной работы робототехники, что может потребовать реконструкции карьера или отдельных его участков;

6) большое количество разнообразных вспомогательных работ (доставка материалов и оборудования, ремонт, дробление негабаритов, зачистка, передвижка путей и т.д.) требует создания универсального роботизированного оборудования;

7) условия работы на месторождениях полезных ископаемых часто являются экстремальными. Запыленная атмосфера рабочего места, высокие или низкие температуры, агрессивная среда могут серьезно повлиять на надежность работы роботов. Герметизация и защита от внешних факторов являются неотъемлемыми свойствами робототехники;

8) на карьерах должна быть обеспечена устойчивая и надежная коммуникационная инфраструктура для максимальной автоматизации технологических процессов, информационного обмена в горнотехнических системах с использованием специализированной беспроводной связи и передачи соответствующих данных по всем объектам горного производства и смежным предприятиям.

Все эти вышеотмеченные особенности означают, что разработчики робототехники для открытых горных работ должны создавать адаптивные, а подчас универсальные роботизированные системы, которые могли бы приспособиться к таким специфическим условиям открытых горных работ. При этом следует иметь в виду, что автоматизация на карьерах может внедряться поэтапно, причем в трех видах: дистанционное управление, телеуправление и полная автоматизация. Различают также четыре уровня автоматизации [12]. Сегодня на практике невозможно одновременно обеспечить одинаковый вид и уровень автоматизации для всех горных и транспортных машин, составляющих горнотехнический комплекс. Это не только весьма затратно, но и технически трудно осуществимо из-за отсутствия рынка роботизированной техники необходимой номенклатуры и параметров для горных предприятий и ограниченных возможностей отечественного, да и зарубежного машиностроительного комплекса в ближайшей перспективе. Использование машин с различным видом и уровнем автоматизации приведет к несогласованности работы смежных производственных процессов, что не позволит достичь кардинальных изменений в росте производительности горнотехнического комплекса оборудования на карьерах. Поэтому считаем, что переход на полную автоматизацию технологических процессов на действующих предприятиях будет происходить постепенно, поэтапно, от самого низшего 1-го уровня до наивысшего 4-го уровня. При этом, как показывают результаты исследований, можно ожидать лишь повышения производительности экскаваторно-автомобильного комплекса (ЭАК) на четвертом уровне роботизации. В работе [3] отмечается, что переход от нулевого уровня, когда отсутствует роботизация, к первому (с дистанционным управлением) и даже ко второму уровню (при реализации «технического зрения») ведет к снижению на 20–25% в среднем (на начальном этапе до 50%) эксплуатационной производительности ЭАК по сравнению с традиционными механизированными комплексами. Это объясняется предельной загруженностью и усталостью операторов вследствие их задействования на каждом процессе управления несколькими автосамосвалами.

Что касается наивысшего, четвертого, уровня роботизации, то он достигается при полной автоматизации, когда роботизированные системы полностью берут на себя управление машинами без вмешательства оператора. В данном контексте речь идет о полной автоматизации всех основных машин, входящих в технологическую цепочку. Следует признать, что сегодня, кроме транспорта и отчасти буровых станков, не роботизирована головная машина комплекса оборудования – экскаватор. Это весьма сложная научная и производственная задача, пока трудноразрешимая. Анализ управления одноковшовыми экскаваторами показывает, что логика управления им весьма сложна. Машинист в течение одного цикла выполняет 12–18 операций, совершая до 90 движений в минуту. Количество используемой информации велико, а качественные технические средства получения этой информации отсутствуют.

В процессе работы экскаватор обязан выполнять целый комплекс вспомогательных работ (зачистка подошвы забоя и погрузочной площадки, ликвидация козырьков и нависей, уборка или разрушение негабаритов и т.д.). Эти виды работ занимают до 10–15% рабочего времени экскаватора. Не меньшие потери времени характерны при селективной выемке сложноструктурных залежей полезных ископаемых. Соответственно, это негативно повлияет на производительность карьерного транспорта, который технологически связан с выемочно-погрузочными работами. Поэтому считаем неверным рассматривать режим работы горнотранспортного оборудования – 24/7 [9], то есть без простоев и перерывов. В реальных условиях горнодобывающих предприятий любая техника требует также постоянного технического обслуживания, заправки топливом, смены масла, замены поврежденных колес, текущего ремонта и т.п. Для электрифицированных машин остановки также неизбежны из-за возможных отключений силовых сетей по разным причинам. Также неизбежна остановка оборудования в период производства взрывных работ.

Нельзя не отметить недостатки роботизированной технологии. Внедрение ее на карьерах требует больших затрат на приобретение роботизированной техники и на создание специальной инфраструктуры на предприятии, обеспечивающей эффективное управление работой как отдельных машин, так и всего комплекса оборудования по всей технологической цепочке. Практически во всех случаях горнотехническая система карьера должна быть адаптирована к условиям совместной работы пилотируемой и автономной техники. Исключить полностью присутствие людей в рабочей зоне невозможно. Это ремонтные бригады, наладчики электронного оборудования и связи, взрывники, операторы вспомогательного оборудования, специалисты различных служб и многие другие. Поэтому о безлюдной технологии открытых горных работ можно пока говорить лишь относительно. Но это не должно менять суть инновационной технологии с применением дистанционно-управляемой и автономной роботизированной техники на основных и вспомогательных работах горного производства.

Доказано исследованиями, что повышение производительности труда и уровня промышленной безопасности может быть достигнуто лишь на новых горнодобывающих предприятиях, в проекты которых закладываются основные принципы и положения системы Интеллектуальный карьер. При этом основной эффект может быть получен за счет изменения главных параметров карьера и элементов системы разработки и вскрывающих трасс. Из опыта зарубежной практики следует, что в этом случае ожидаемые результаты от внедрения роботизированных технологий достигаются лишь в средней и долгосрочной перспективе.

На действующих предприятиях автоматизированная и роботизированная технология будет осуществляться поэтапно. Вначале найдут применение горные и транспортные машины с дистанционным управлением при ведении горных работ в опасных зонах карьера. В дальнейшем может быть переход на автономные машины. Кроме того, в перспективе возможен постепенный ввод участков горных работ с безлюдной технологией.

Безусловно широкомасштабное использование роботизированной горной техники на открытых горных работах приведет к росту производительности труда и повышению основных показателей уровня промышленной и экологической безопасности. Между тем переход от традиционной механизированной технологии к роботизированным горнотехническим системам открытых горных работ порождает многочисленные проблемы и задачи горного производства. При этом обязательно должен быть задействован научный потенциал многих институтов, что должно привести к существенным изменениям в методологических принципах и основах проектирования роботизированных горнотехнических систем, правилах безопасности ведения горных работ и труда, а также к появлению новых образцов высокоавтоматизированной горнотранспортной техники, в том числе наделенных искусственным интеллектом.

Заключение

1. Наметившийся в последнее десятилетие переход к роботизированной горной технике и безлюдным геотехнологиям добычи полезных ископаемых следует рассматривать как современный этап цифровой трансформации горнодобывающих предприятий. Создание цифровых производств и предприятий – это объективная реальность, с чем следует считаться при планировании научных исследований и проектировании горнотехнических систем.
2. Роботизация производственных процессов добычи полезных ископаемых является одним из направлений повышения эффективности освоения недр открытым способом и уровня безопасности горного производства, особенно в сложных горнотехнических и климатических условиях разработки месторождений твердых полезных ископаемых.
3. Основным и первоочередным для роботизации производственным процессом является перемещение карьерных грузов с помощью мобильного автомобильного транспорта, на который приходится основной объем внутрикарьерных перевозок и практически половина затрат в себестоимости добычи полезного ископаемого.
4. Широкому применению робототехники на карьерах препятствуют особенности существующей на карьерах традиционной геотехнологии, а также изменчивость горно-геологических и горнотехнических условий разработки, наличие большого числа технологически взаимосвязанных между собой производственных процессов, большие размеры рабочей зоны карьера и их изменчивость во времени, экстре-

мальные условия работы оборудования и обслуживающего персонала и т.д.

5. Внедрение автономной роботизированной техники на карьерах и создание новой инфраструктуры требуют огромных инвестиций. Практикой доказано, что ожидаемые результаты от внедрения роботизированных открытых геотехнологий достигаются в основном за счет изменения главных параметров как действующих, так и новых карьеров.
6. Использование на карьерах роботизированного горнотранспортного комплекса оборудования может в настоящее время и в ближайшей перспективе сдерживаться отсутствием нормативной, методической и законодательной базы и несоответствием технологической среды действующих карьеров к требованиям и параметрам инновационных технологий.
7. Переход к роботизированной геотехнологии должен привести к пересмотру и изменению методических рекомендаций и норм технологического проектирования горнотехнических систем, а также потребуются изменения и дополнения в Единые правила безопасности при ведении открытых горных работ.

Список литературы / References

1. Трубецкой К.Н., Рыльникова М.В., Владимиров Д.Я. От системы «карьер» к новому интеллектуальному укладу открытых горных работ. *Проблемы недропользования*. 2019;(3):39–48. Режим доступа: https://trud.igduran.ru/index.php/psu/article/view/408 (дата обращения: 20.05.2025).
Trubetskoy K.N., Rylnikova M.V., Vladimirov D.Ya. From the system “pit” to the new intellectual structure of open cast mining. *Problems of Subsoil Us*e. 2019;(3):39–48. (In Russ.) Available at: https://trud.igduran.ru/index.php/psu/article/view/408 (accessed: 20.05.2025).

2. Владимиров Д.Я. Интеллектуальный карьер: эволюция или революция? *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(S1-1):77–82.
Vladimirov D.Ya. Intelligent open pit mine: evolution or revolution? *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(S1-1):77–82. (In Russ.)

3. Акишев А.Н., Бабаскин С.Л., Зырянов И.В., Кожемякин А.А., Федеряев О.В. Анализ результатов опытно-промышленных испытаний схем вскрытия крутонаклонными съездами и эксплуатации горнотранспортного оборудования с системами дистанционного управления (на примере карьера «Удачный»). Г*орный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(S1-1):357–370.
Akishev A.N., Babaskin S.L., Zyryanov I.V., Kozhemyakin A.A., Federyaev O.V. Analysis of the results of experimental-industrial trials of opening schemes by steeply inclined ramps and running of mining and transport equipment with remote control systems (on the example of open pit “Udachny”). *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(S1-1):357–370. (In Russ.)

4. Яковлев В.Л., Тарасов П.И., Фурин В.О., Зырянов И.В. *Углубочный комплекс для доработки кимберлитовых карьеров*. Екатеринбург: УрО РАН; 2015. 268 с.

5. Зырянов И.В., Ильбульдин Д.Х., Кондратюк А.П. Параметры системы дистанционного управления горнотранспортным оборудованием в условиях Удачнинского ГОКа. *Горная промышленность*. 2016;(5):49–51.
Zyryanov I.V., Ilbuldin D.Kh., Kondratyuk A.P. Parameters of a mine fleet remote control system in conditions of the Udachny mining & processing division. *Russian Mining Industry*. 2016;(5):49–51. (In Russ.)

6. Еремин С.Г., Капитанец Ю.В., Зубенко А.В., Бартошевич И.А., Кущёв Н.П. Анализ влияния внедрения автоматизированных систем управления горным производством на эффективность и безопасность работы горнодобывающих предприятий России. *Горная промышленность*. 2024;(5):101–107. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-101-107
Eremin S.G., Kapitanets Yu.V., Zubenko A.V., Bartoshevich I.A., Kushchev N.P. . Analyzing the impact of introducing automated mining process control systems on the efficiency and safety of mining enterprises in Russia. Russian Mining Industry. 2024;(5):101–107. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-101-107

7. Халбашкеев А. Что нужно роботу для счастья? *Добывающая промышленность*. 2022;(1):86–90.
Khalbashkeev A. What does a robot need to be happy? *Dobyvayushchaya Promyshlennost*. 2022;(1):86–90. (In Russ.)

8. Corrigan C.C., Ikonnikova S.A. A review of the use of AI in the mining industry: Insights and ethical considerations for multi-objective optimization. *The Extractive Industries and Society*. 2024;17:101440. https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101440

9. Гучек Е.М., Клебанов Д.А. График 24/7 и без нервов: преимущества и возможности роботизированного карьерного самосвала БЕЛАЗ грузоподъемностью 130 тонн. Уголь Кузбасса. 2018;(1):20–23. Режим доступа: https://uk42.ru/index.php?id=6907 (дата обращения: 20.05.2025).
Guchek E.M., Klebanov D.A. 24/7 operation without stress: advantages and capabilities of the BELAZ robotic mining dump truck with the payload of 130 tonnes. Ugol' Kuzbassa. 2018;(1):20–23. (In Russ.) Available at: https://uk42.ru/index.php?id=6907 (accessed: 20.05.2025).

10. Тищенко И.В., Ванаг Ю.В. Автоматизация и роботизация добычи твердых полезных ископаемых. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. 2022;2(3):325–333 https://doi.org/10.33764/2618-981X-2022-2-3-325-333
Tishchenko I.V., Vanag Yu.V. Automation and robotization of solid mineral mining. *Interexpo GEO-Siberia*. 2022;2(3):325–333. (In Russ.) https://doi.org/10.33764/2618-981X-2022-2-3-325-333

11. Хазин М.Л. Роботизированная техника для добычи полезных ископаемых. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2020;18(1):4–15. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-4-15
Khazin M.L. Robotic equipment for mining operations. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2020;18(1):4–15. (In Russ.) https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-4-15

12. Зиновьев В.В., Кузнецов И.С., Николаев П.И., Стародубов А.Н. Имитационное моделирование роботизируемых технологий открытых и подземных горных работ. *Горная промышленность*. 2023;(S2):65–76. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S2-65-76
Sinoviev V.V., Kuznetsov I.S., Nikolaev P.I., Starodubov A.N. Simulation modelling of robotic open and underground coalmining systems. *Russian Mining Industry*. 2023;(S2):65–76. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S2-65-76

13. Клебанов А.Ф. Автоматизация и роботизация открытых горных работ: опыт цифровой трансформации. *Горная промышленность*. 2020;(1):8–11. Режим доступа: https://mining-media.ru/ru/article/ogr/15630-avtomatizatsiya-i-robotizatsiya-otkrytykh-gornykh-rabot-opyt-tsifrovoj-transformatsii (дата обращения: 20.05.2025).
Klebanov A.F. Automation and robotization in opencast mining: experience in digital transformation. *Russian Mining Industry*. 2020;(1):8–11. (In Russ.) Available at: https://mining-media.ru/ru/article/ogr/15630-avtomatizatsiya-i-robotizatsiya-otkrytykh-gornykh-rabot-opyt-tsifrovoj-transformatsii (accessed: 20.05.2025).

Информация об авторах
Коваленко Владимир Сергеевич – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: Kovalenko_v@ipkonran.ru
Зырянов Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: Zyryanoviv@inbox.ru

Information about the authors
Vladimir S. Kovalenko – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Leading Research Associate, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: Kovalenko_v@ipkonran.ru
Igor V. Zyryanov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Leading Research Associate, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: Zyryanoviv@inbox.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 20.06.2025
Поступила после рецензирования: 31.07.2025
Принята к публикации: 01.08.2025

Article info
Received: 20.06.2025
Revised: 31.07.2025
Accepted: 01.08.2025