ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

УДК 622.22:622.6

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-8-90-108

Цифровая трансформация технологических процессов подземных горных работ: ретроспективный анализ и мировой опыт

Громов Е. В.^{1, 2}

¹ Горный институт Кольского научного центра РАН, г. Апатиты, Россия

² Мурманский арктический государственный университет, г. Апатиты, Россия

e-mail: evgromov@list.ru

Реферат

Введение. Представлены этапы перехода подземных горных работ от механизации к автоматизации основных производственных процессов. Детально рассмотрен опыт применения различных уровней автоматизации на отечественных и зарубежных предприятиях.

Методология. Выполнен ретроспективный анализ достоинств и недостатков внедрения цифровых технологий на почти 30 рудниках и шахтах с подземным и комбинированным способами разработки.

Результаты. Установлено, что в настоящее время наибольшее распространение получило полуавтоматическое и автономное управление отдельными производственными процессами. Основные преимущества, полученные в ходе промышленных испытаний, заключаются в возможности работы в межсменных перерывах, в загазованной среде и при большей скорости движения оборудования, что позволило значительно увеличить производительность. На многих рудниках удалось сократить количество рабочего персонала до 80 %, затраты на техобслуживание – до 60 %, увеличить производительность до 30 %, уменьшить эксплуатационные расходы до 25 % и повысить срок службы техники до 45 %. Значительно уменьшилось влияние вредных и опасных факторов на персонал, находящийся в основном на поверхности рудника.

Выводы. Значительное повышение эффективности работы следует искать в комплексной цифровизации и автономной работе всего предприятия, имеющего единый центр сбора информации, ее анализа и управления всеми технологическими процессами. Для создания автономного «цифрового предприятия» требуется время и поэтапный переход всех производственных процессов на автономный режим работы.

Ключевые слова: цифровая трансформация; Индустрия 4.0; автоматизация; роботизация; подземные горные работы; технологические процессы.

Введение. Добыча полезных ископаемых с каждым годом ведется все в более сложных и опасных горно-геологических и климатических условиях. При этом разработка месторождений в районах Крайнего Севера, пустынных и горных регионах с недостаточно развитой социальной инфраструктурой существенно затрудняет участие человека в технологических процессах, а работа на больших глубинах в усложняющейся геомеханической обстановке становится для человека все более опасной. В то же время в условиях повсеместного снижения качества добываемой руды требуется обеспечивать рост масштабов добычи и соответственно интенсифицировать производство работ. Решением указанных проблем может стать переход к передовым цифровым и роботизированным технологиям

добычи руды, которые обеспечивают возможность удаленной работы в безопасных условиях труда, минимизацию человеческого фактора при выполнении производственных операций, возможность обработки большого объема данных для принятия правильных решений и позволяют минимизировать затраты на горные работы (сокращение численности персонала и количества горных выработок, снижение расходов на проветривание, повышение производительности техники за счет работы в межсменных перерывах и др.). Переход с ручного на автоматизированное цифровое управление позволит избежать «пиковых» нагрузок на оборудование, вызывающих его повышенный износ, возникновение аварийных ситуаций (соприкосновения со стенками горных выработок, «газ в пол», резкий «сброс» скорости и пр.) и др. Перечисленные проблемы ручного управления в особенности актуальны для подземной разработки, где работы ведутся в стесненных условиях и время полезного использования техники ниже, чем на открытых горных работах.

Процесс перехода на цифровые технологии происходит постепенно, начиная с 1970-х гг. (начало значительной модернизации и перевооружения рудников). В 2010-х большинство индустриально развитых стран и многие развивающиеся страны (всего около 140) приняли решения о «Цифровой трансформации» производства на базе «Индустрии 4.0» (четвертая промышленная революция).

«Цифровая трансформация» предполагает глубокие и всесторонние изменения в производственных и социальных процессах, связанные с тотальной заменой аналоговых технических систем цифровыми и широкомасштабным применением цифровых технологий [1]. «Индустрия 4.0» предусматривает цифровизацию и интеграцию всех производственных процессов, т. е. массовое внедрение интеллектуальных киберфизических систем в производство (интеграция вычислительных ресурсов в физические сущности), объединение всех элементов производства и окружающей его среды в единую глобальную сеть «Интернет вещей» и является рубежом технологического развития [2, 3]. Анализ инновационных технологий, проводимый в последнее время многими исследователями, свидетельствует о том, что этот рубеж предполагается достигнуть в период 2025–2028 гг. Это позволит значительно повысить производительность труда и снизить себестоимость производства товарной продукции [3]. В настоящем исследовании речь пойдет преимущественно о цифровой трансформации основных производственных процессов подземных горных работ.

Возникновение и развитие цифровых технологий подземных горных работ. Достижения и мировой опыт в области робототехники и сенсорных технологий в настоящее время делают горное оборудование гораздо более доступным и производительным, благодаря этому отрасль кардинально меняется. Использование автоматизированного управления становится все более распространенным. До середины XX в. все основные технологические процессы выполнялись вручную, но с приходом механизации как следствия 3-й промышленной революции (массового перехода от ручного труда к машинному) было положено начало для дальнейшего внедрения автоматизированных и роботизированных систем. С годами уровень автоматизации на горных предприятиях постепенно продолжал и продолжает расти (рис. 1), во многом это обуславливается улучшением коммуникаций и развитием компьютерных технологий.

Начало комплексной механизации процессов подземной добычи полезных ископаемых относится к 1960-м гг., когда в очистных забоях по пологим пластам угля стали внедрять механизированные выемочные комплексы [4].

Переход на следующий уровень технологического развития связывают с созданием блока дистанционного управления в пределах прямой видимости, кото-

рый впервые появился на шахтах канадской провинции Онтарио в 1970-х гг. и значительно повысил безопасность работы оператора самоходной техники.

Вслед за ним появилось телематическое управление, которое на раннем этапе своего развития в 1980-х гг. использовало комбинацию радиосвязи, волоконной оптики, систем наведения на основе оптических систем или лазеров. Первые неудачные попытки телеуправления в середине 1980-х гг. с использованием стандартного телевизионного сигнала были связаны с плохим качеством изображения и необходимостью оставаться в непосредственной близости от управляемого оборудования. Наиболее доступная в то время технология называлась Automatic Guided Vehicles (AGV).

Рис. 1. Эволюция механизации технологических процессов в комплексную промышленную роботизацию в парадигме «Индустрия 4.0»

Fig. 1. Evolution of flow processes mechanization into the integrated industrial robotization in the paradigm of "Industry 4.0"

Исследования в области полуавтономной работы подземного оборудования начались во второй половине 1980-х гг. К концу 1990-х – началу 2000-х гг. появились первые коммерческие предложения. Например, уже в 1998 г. компания Atlas Copco представила компьютеризированную систему управления буровой установкой Rig Control System (RCS) [5].

Автономное (роботизированное) управление в подземных условиях получило свое распространение с начала 2000-х гг. Однако первые экспериментальные образцы и отдельные попытки автономизации процессов начали появляться несколько раньше (например, роботизированная система электровозной откатки с донной разгрузкой начала внедряться на руднике Kiruna с 1971 г. В настоящее время насчитывается уже пять поколений безлюдных электровозов) [6].

Выбор наиболее оптимального уровня автоматизации или роботизации производства зависит от особенностей самого технологического процесса, применяемого горного оборудования, инфраструктуры и системы связи рудника, а также многого другого. Опыт применения автоматизации основных технологических процессов, достигнутый на сегодняшний день в мировой горнодобывающей промышленности, будет рассмотрен далее более подробно.

Дистанционное управление (ДУ) в пределах прямой видимости (1-й уровень). Этот уровень автоматизации предполагает наиболее значительное участие человека в технологических операциях и заключается в том, что оператор, находясь на безопасном расстоянии, работает в зоне прямой видимости объекта, управляемого им с пульта ДУ. Для выполнения своей работы он пользуется блоком управления, имитирующим кабину самоходной техники.

К достоинствам ДУ в пределах прямой видимости относят повышение безопасности персонала, умеренную дополнительную стоимость оборудования. Недостатками являются высокий риск повреждения техники, низкий (близкий к ручному управлению) коэффициент использования оборудования.

Технология ДУ в пределах прямой видимости нашла широкое распространение при работе самоходных погрузочно-доставочных машин (ПДМ) в опасных условиях (в том числе в открытых очистных пространствах рудников) – там, где работа оборудования с присутствием человека наиболее опасна или запрещена (п. 94, б ФНП) (*Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых (Зарегистрировано в Минюсте России 02.07.2014 № 32935) // Приказ Ростехнадзора от 11.12.2013 № 599 (ред. от 21.11.2019)*).

Рис. 2. Работа ПДМ с дистанционным управлением при отгрузке рудной массы

Fig. 2. LHD machine with remote control operation when offloading the rock mass

Так, на карьере Молодежный ОАО «Учалинский ГОК» в 2010–2012 гг. при проведении опытно-промышленных испытаний (ОПИ) технологии отработки придонных и прибортовых запасов разделительного рудного целика месторождения Молодежное камерной системы разработки (с открытым в карьер выработанным пространством и последующей твердеющей закладкой) доставка руды из камер до перегрузочного пункта осуществлялась ПДМ TORO-400 и МПД-4, оборудованными системой ДУ типа Torotel. При отработке в 2011 г. прибортовых запасов Северной выclinки и прибортовых запасов карьера на Учалинском руднике того же предприятия отгрузка руды из камеры осуществлялась через боковые заезды ПДМ TORO-501D с ручным управлением без заезда в очистное пространство, а последующая зачистка камер производилась ПДМ TORO-400, TORO-9, TORO-1400, СТ-1030, Caterpillar R2900G с заездом в очистное пространство камер и карьера с использованием ДУ (рис. 2). Такая организация отгрузки руды позволила безопасно осуществить раздельную отгрузку руды и породы и исключить сверхнормативное разубоживание руды [7].

На урановом руднике № 6 ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» (ППГХО) в 2015 г. начались научные проработки и внедрение в производство этажно-камерной системы разработки с донным выпуском и комбинированной технологией отработки камер (с тросоцементным укреплением пород и применением дистанционно управляемой погрузочно-доставочной

Рис. 3. Система шахтной беспроводной связи, позиционирования, передачи данных и потокового видео
Fig. 3. The system of shaft wireless communication, location, data transfer, and video streaming

техники для работы в открытом очистном пространстве) [8]. Испытания на примере опытно-промышленного блока показали, что использование ДУ ПДМ без укрепления боков камеры позволяет снизить потери руды, но приводит к большому разубоживанию за счет отслоения пород (до 40 %). Укрепление пород без использования ДУ ПДМ позволяет снизить разубоживание, но приводит к большим потерям урановой руды в днище камер (до 30 %). Тогда как себестоимость добычи руды при варианте с использованием ДУ ПДМ и предварительного укрепления пород является наименьшей. Синергетический эффект от применения комбинированной технологии отработки камер составил по потерям руды – 5 %, по разубоживанию – 6–8 % [9].

Телематическое управление (ТУ) (2-й уровень). При этом уровне автоматизации оператор, как правило, находится в подземных условиях и управляет техникой с помощью передвижной или полустационарной станции ТУ, находясь в безопасном и защищенном месте, удаленном от непосредственного производства работ.

Управление техникой осуществляется с помощью видеокамер и манипуляторов, а также другими средствами подачи управляющего сигнала технике и мониторам, с помощью которых оператор определяет текущее местоположение техники и осуществляет за ней контроль. Изображение передается на мониторы с помощью видеокамер, различных датчиков наблюдения. По сравнению с ДУ в пределах прямой видимости, ТУ удаляет оператора на значительно большее расстояние.

Достоинствами ТУ являются умеренная стоимость, значительное повышение безопасности персонала, повышение коэффициента использования техники, так как оператору не нужно добираться непосредственно к месту выполнения работ. Недостатки: высокий риск повреждения техники, обусловленный наличием человеческого фактора.

Данный уровень автоматизации (так же, как и предыдущий) наибольшее распространение получил при уборке и транспортировании горной массы самоходной техникой. Например, на руднике «Октябрьский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» в связи с доработкой богатых запасов с 1999 г. начата отработка бедных медистых руд. Для снижения затрат на добычу руды на руднике с 2005 по 2016 г. проводились опытно-промышленные испытания по внедрению камерных систем разработки с доставкой основного объема отбитой руды из камер (до 80 %) ПДМ с ручным управлением через торцевые и(или) боковые заезды в них, а остальной объем руды – с отгрузкой ПДМ на дистанционном управлении [10]. Отгрузку горной массы производили ПДМ грузоподъемностью от 10 до 17 т следующих марок: Caterpillar R-2900 G на ТУ, Atlas Copco ST-1520, Atlas Copco ST-14 на ТУ, Sandvik LH514, Caterpillar R-1700 G, Caterpillar R-1600 G, Atlas Copco ST-1030R [11]. Внедрение ПДМ на ТУ позволило увеличить производительность, снизить потери руды и обеспечить безопасность и комфортность труда рабочих. В 2017–2018 гг. на руднике проходили испытания системы шахтной беспроводной связи, позиционирования и передачи данных, разработанной специалистами концерна РОСТЕХ, при дистанционном управлении ПДМ с мобильных пунктов, расположенных в подземных условиях вне опасных зон. В результате испытаний было установлено, что дальность действия передачи потокового видео на прямолинейных участках горных выработок достигает 1000 м, а максимальное захождение за повороты составляет 400 м. Система также использовалась для управления железнодорожным транспортом. Описание работы системы представлено на рис. 3 [12].

На руднике Diavik (Rio Tinto), расположенном в субарктической тундре вдали от населенных пунктов (около 300 км до г. Йеллоунайф) в 2008 г. начали испытания ПДМ на ТУ компании Atlas Copco. На сегодняшний день при системе разработки с подэтажным обрушением и проходке выработок главным образом используются ПДМ ST1530 с ручным управлением, а на системе разработки с ООП, а также закладочных операциях применяются ПДМ ST14 и ST18, управляемые дистанционно. ТУ ПДМ позволяет безопасно отрабатывать запасы вблизи очистного пространства карьера в условиях неблагоприятных геотехнических событий, таких как прорывы поверхностных вод. Вся техника и работающий персонал оснащены специальными радиочастотными метками, о нахождении которых в радиусе 50 м сообщается оператору ПДМ [13, 14]. На бурении взрывных скважин в системе разработки с ООП применяется установка Atlas Copco Simba M7, а при подэтажном обрушении Simba M6. На машинах используется сухое бурение (без воды) с ТУ при работе в опасных зонах либо вблизи участков выхода в карьер [15]. На буровых установках установлено по три камеры: одна стационарная на верхней части кабины и две съемные с возможностью поворота и приближения. Для каждой камеры предусмотрен свой монитор, что позволяет осуществлять наиболее тщательный контроль над бурением [13].

Рис. 4. Полуавтоматическое бурение на Кировском руднике
КФ АО «Апатит»

Fig. 4. Semiautomatic drilling at the Kirovsky mine of Kirovsk Branch of Apatit

Полуавтоматическое управление (ПУ) (3-й уровень). Данный уровень автоматизации схож с телематическим управлением, потому что все также требуется управление техникой оператором, но уже в меньшей степени, поскольку часть функций становится автоматизированной, а само управление техникой, как правило, осуществляется с поверхности, за счет чего отсутствует необходимость спуска оператора в подземный рудник. Общие функции включают в себя как своевременное принятие решений, так и системы предотвращения столкновений. На примере работы ПДМ на уборке горной массы можно описать алгоритм работы следующим образом: техника движется самостоятельно от точки погрузки до точки разгрузки по заданной траектории, в момент выполнения погрузочно-разгрузочных работ машина останавливается, оператору поступает сигнал, и он осу-

ществляет ТУ этими операциями, после чего машина снова движется в автоматическом режиме.

В последние годы на Кировском (с 2018 г.) и Расвумчоррском (с 2019 г.) рудниках КФ АО «Апатит» активно происходит внедрение уникального для нашей страны проекта дистанционного бурения очистных скважин с использованием электронных паспортов бурения. Паспорт бурения загружается в информационную систему буровой установки Simba E7C через внешний накопитель или рудничную сеть (Wi-Fi). Предварительно маркшейдер намечает на боках выработки две точки, координаты которых позволяют машине позиционировать себя в пространстве. Оператор, находясь в кабине буровой установки (БУ) в подземных условиях, производит доставку и монтаж техники в очистном забое, после чего машина начинает бурить в автоматическом режиме. Первоначально для управления 3 единицами техники использовались 2 оператора, один из которых управлял БУ с поверхности рудника (рис. 4), а второй, находясь в подземных условиях, осуществлял навигацию БУ и ее перестановку с веера на веер [16]. На следующем этапе 3 оператора управляли 6 единицами техники. В настоящее время предприятие доукомплектовывает парк еще 4 БУ. Таким образом, в управлении работой 10 единиц техники участвуют не более 4 человек. Последний этап внедрения проекта заключается в автоматизации переезда буровых установок между веерами скважин. Внедрение технологии дистанционного ПУ бурения уже сегодня позволило получить следующий эффект: повысить суточную производительность БУ на 24 % [17], а точность бурения на 60–80 % (при длине скважины 36 м отклонение от проектного контура снизилось с 2,5 м до 0,6–0,7 м), уменьшить выход негабаритных кусков более чем в 2 раза (с 12,5 % до 6 %), а удельный расход взрывчатых веществ на 9,5 %, увеличить коэффициент использования техники и производительность БУ на 20 %.

На подземных рудниках «Удачный» и «Айхал» АК «Алроса» начали работу новые модели БУ – Sandvik DL421, предназначенные для бурения вертикальных, наклонных веерных, параллельных и одиночных скважин диаметром от 64 до 115 мм и глубиной до 54 м. Для повышения безопасности, точности и производительности буровых работ внедряются электронные паспорта бурения, которые планируется разрабатывать в ГТИС MicroMine и переносить на буровую установку с помощью обычного USB флэш-накопителя [18].

Достоинствами ПУ являются: низкий риск повреждения и увеличение срока службы оборудования, значительное повышение коэффициента использования техники, значительное повышение безопасности персонала, возможность управления несколькими единицами оборудования. Основной недостаток – это высокая стоимость строительства необходимой инфраструктуры и программного обеспечения.

Комплексное внедрение системы ПУ получили на рудниках Kiruna и Malmberget компании LKAB (Швеция). На руднике Kiruna работы по внедрению ПУ ПДМ ведутся начиная с 1987 г. В 2002 г. была автоматизирована половина парка ПДМ. Один оператор, находящийся в центральном диспетчерском пункте на поверхности, управлял работой до 3 единиц техники. Технология представляла собой телематическую загрузку ковша и полностью автоматическое транспортирование и разгрузку ПДМ. Полученный положительный эффект заключался в уменьшении расходов на оплату труда рабочих и техобслуживание машин (так как они стали работать без пиковых нагрузок и меньше контактировали со стенками выработок), вырос срок службы шин (из-за отсутствия экстренных торможений). Расходы на масло, топливо, срок службы ковша остались прежними [19]. С 2018 по 2023 г. на руднике планируется проведение масштабных ОПИ системы

разработки с ПОТ с увеличенной высотой подэтажа и автоматизацией буровых и погрузочно-транспортных работ (будут использованы ПДМ и автосамосвалы, оснащенные электрическим приводом или аккумуляторными батареями). Подразделение LKAB Wassara AB планирует провести испытания гидравлических погружных пневмоударников собственной разработки на буровых установках компании Epirock (в комплексе с современными системами контроля бурения Rig Control System и Rig Remote Access) для бурения скважин длиной до 60 м. Испытание погружных гидроударников уже в 1990–1995 г. позволило бурить скважины длиной до 60 м с отклонением от проектного контура менее чем на 1,5 % по сравнению с 5–20 % при других способах бурения. Это позволило увеличить выход руды с 1 м скважины, объем отбиваемой секции вырос более чем на 800 % (с 1,2 до 10 тыс. т), и расстояние между выработками и подэтажами увеличилось с 12 до 28 м, а количество выработок – на 70 % (рис. 5). Новые испытания предполагают дальнейшее уменьшение отклонения бурения от проектных показателей (менее 1 %). Сегодня же благодаря внедрению ПУ бурением (1 оператор с поверхности управляет 3–6 установками) с использованием новых буровых установок S7 удалось снизить отклонение скважины менее чем до 1 % при длине скважин до 56 м. Достигнутая скорость бурения при этом составляет 0,5–1 метр в минуту при диаметре скважины 115 мм [20].

На руднике Malmberget ПУ ПДМ осуществляется системой MINEGEM (Caterpillar) на машинах типа Caterpillar R2900G, что позволило увеличить производительность на 10–20 % (в основном за счет работы после взрывов и в ночное время), уменьшились повреждения машин, повысилась безопасность и эргономика работы персонала, управляющего техникой с поверхности [21].

Крупнейший подземный рудник в Австралии Olympic Dam (BHP Billiton) испытывает автоматизированные ПДМ с 1999 г. Первоначально использовалась система управления DAS для работы ПДМ Elphinstone R2900. Основные проблемы первых испытаний были связаны с низкой скоростью управления (до 5 км/ч) и неконтролируемыми заносами машины при попытках увеличить скорость (до 15 км/ч). После доработки системы управления в 2002 г. были полностью автоматизированы доставка и разгрузка руды при тестовой скорости до 20 км/ч. Система успешно работала в запыленной среде. Пересменка сократилась с 1–2 часов до нескольких минут. Также на плохих дорогах автоматизированные ПДМ двигались быстрее (12 км/ч), чем машины на ручном управлении (5 км/ч). В 2002 г. рудник перешел на систему управления MINEGEM, показавшую, что техника работает успешно, за исключением резких поворотов, когда из-за большой скорости возможно задевание зубьями ковша стенок выработки. Время использования смены составило 90 % (10 % простоя из-за потери радиосигнала и негабаритов), т. е. автоматизированные ПДМ работали в смену на 1,9 ч больше, чем при ручном управлении, при этом 1 оператор с поверхности рудника управлял 2 машинами [22].

На руднике Finsch (De Beers), расположенном в ЮАР в 165 км от г. Кимберли, при переходе в 2005 г. на добычу системами разработки с самообрушением (первые в мировой алмазодобывающей практике) при выемке бл. 4 гор. 62 были автоматизированы все производственные процессы с использованием оборудования компании Sandvik [23]. Бурение глубоких скважин было реализовано сухим способом для сохранения структуры кимберлитов в полуавтоматическом режиме. При автоматизации погрузочно-доставочных и транспортных работ Sandvik первоначально автоматизировали 4, а далее 6 автосамосвалов Togo 50D. Самосвалы загружались ПДМ Togo 007 с ручным управлением и далее автономно везли руду по транспортному кольцу на расстояние 2,4 км со скоростью до 30 км/ч. На следующем этапе были автоматизированы 8 ПДМ, на которых погрузка руды осу-

ществлялась телематически оператором, а процессы транспортирования и разгрузки выполнялись автономно. Внедрение автоматизации позволило сократить количество автосамосвалов на 30 % (7 вместо 10 машин), количество операторов на 80 % (2 вместо 10 человек), затраты на техобслуживание – на 60 %, а также увеличить экономически целесообразный срок службы техники на 45 % [24].

Рис. 5. Обуриваемая секция до внедрения новой технологии бурения и после
Fig. 5. Drilled around section before and after the introduction of new technology of drilling

В 2015 г. автоматизация ПДМ и автосамосвалов на руднике Glencore Kidd (Rio Tinto, Канада) для ликвидации простоев из-за проветривания выработок после взрывов показала увеличение производительности ПДМ на 121 % и откатки руды автосамосвалами на 50 % [14]. В том же году компанией Rio Tinto на руднике Northparkes (Австралия) была достигнута 100 %-ная автоматизация парка ПДМ. Поставщиком оборудования – компанией Sandvik – было произведено сравнение автоматизированного и ручного управления ПДМ, показавшее увеличение суточной производительности на 23 %, снижение эксплуатационных расходов на 24 %, штата операторов – на 60 %. Коэффициент использования техники вырос до 95 % в течение 12-часовой смены [25].

Компания Codelco первой в Чили в 2003 г. реализовала крупномасштабную автоматизацию шести ПДМ на 2 своих шахтах: 3 – на шахте Pipe Norte и 3 – на Diablo Regimiento. Всеми ПДМ Sandvik 0010C с номинальной грузоподъемно-

стью 17,5 т управляли из одной контрольной комнаты, расположенной на расстоянии 10 км от рудника. Для управления использовалась система AutoMine, где погрузка горной массы осуществлялась телематически, а транспортирование (в обе стороны) и разгрузка были полностью автономны. Один оператор управлял 3 машинами. Результаты показали необходимость повышения квалификации персонала, уменьшение времени простоя техники, меньший износ запчастей и шин и соответственно уменьшение расходов на сервисное обслуживание. Однако по неизвестным причинам после 2011 г. автоматизация ПДМ использовалась лишь на шахте Pipe Norte. Приобретенный опыт компания реализовала еще на одном своем предприятии – руднике Andina, где применяется ПУ ПДМ Atlas Copco ST-14, преимущества которого по сравнению с ручным управлением обусловлены повышением безопасности работ и увеличением производительности с 45 до 80 тыс. т/мес или с 340 до 415 т/час. При этом пункт управления ПДМ находился в городе в 80 км от подземной шахты [26].

Рис. 6. Схема вскрытия месторождения (слева) и варианты развития транспортного гор. –1365 м (с традиционным развитием инфраструктуры и поэтапным строительством с применением многомодульных локомотивов)

Fig. 6. Field opening scheme (left) and the options of transport hor. –1365 m development (with conventional development of facilities and step by step construction with the use of the multimodule locomotives)

Компанией INCO в Канаде в 1999 г. использована система управления light wire (с шумоподавлением) для автоматизации 6 ПДМ (1 оператор управлял 6 машинами) на руднике Stobie и 2 ПДМ на руднике Creighton. Основными преимуществами стали: увеличение на 2–3 ч времени работы техники в смену, увеличение срока службы оборудования и сокращение расходов на техобслуживание и шины, прогноз неполадок двигателя и износа шин, позволяющий планировать ремонт и замену. Это привело к снижению стоимости работ и повышению безопасности [14].

Полностью автоматизированное управление (роботизация) (4-й уровень).

Полностью автоматизированное управление может предполагать автономную работу одной или нескольких единиц техники, где оператор лишь осуществляет наблюдение за процессом. Роботизированные компоненты управляют всеми важными функциями оборудования (например, ускорение, рулевое управление, тор-

можение, управление ковшем, стрелой и т. д.) без необходимости вмешательства оператора. Полностью автономные системы горных работ имеют наибольшую производительность по сравнению с остальными видами автоматизации, поскольку программное обеспечение контролирует одну или несколько горных машин, позволяющих операторам осуществлять функции мониторинга, устранение неполадок.

К достоинствам роботизации можно отнести: значительное повышение безопасности персонала, управление одной или несколькими единицами техники одним оператором, низкий риск повреждения и увеличение срока службы оборудования, значительное повышение коэффициента использования техники и производительности оборудования. Недостатки: наиболее высокая стоимость и сложность организации работы.

В 2007–2008 гг. на руднике Outokompo (Kemi mine, Финляндия) на закладочных работах тестировали автономную ПДМ Atlas Copco ST-14. Для отслеживания и позиционирования машины на ней были установлены 4 камеры (2 спереди и 2 сзади), а также камеры в зоне погрузки и разгрузки. Кроме того, машины были оборудованы лазерными датчиками, позволяющими сканировать стенки выработки в радиусе 35 м. Проблем с автоматическим транспортированием и разгрузкой не было, требовалось автоматизировать процесс черпания горной массы. О результатах эксперимента известно достаточно мало, однако компания декларировала, что при внезапном обрушении налегающей горной массы в выработке тестируемая машина успешно справилась с работой в опасной зоне и выполнила необходимый объем закладочных работ [27].

На руднике Xstrata (Brunswick, Канада), разрабатывающем цинковые руды на глубине 1120 м, применялись 2 системы разработки: с закладкой и с открытым выработанным пространством (ОВП). Применение дистанционно управляемых ПДМ оказалось предпочтительнее для системы с ОВП, где целики обрабатываются после выемки запасов камер. Отбитая руда с камер транспортируется в рудоспуски, питающие три дробильные установки. Автономная погрузка тестировалась с 1990 г. на ПДМ Wagner ST-8B. В результате сравнения с телематической погрузкой установлено, что при автономной загрузке заполнение ковша больше в среднем на 4 % и быстрее на 24 %. Однако для различных условий работы наилучший результат дало сочетание методов телематического и автономного управления [28].

На руднике BHP Billiton (Olympic Dam Operation, Австралия) к моменту проведения испытаний автономной работы ПДМ уже было освоено полуавтоматическое управление с автономным транспортированием и разгрузкой ПДМ и телематическим управлением черпанием горной массы. Цель новых исследований состояла в автоматизации процесса загрузки ковша, для чего применили систему Autodig (Caterpillar). Ожидаемые результаты не подтвердились: во-первых, трудно было выполнить настройку системы в зависимости от крупности кусков и только в 30 % случаев удавалось с 1-го захода полностью заполнить ковш, во-вторых, при пробуксовке колес во время движения задним ходом система пыталась выпрямить траекторию движения машины и происходили столкновения со стенками выработки. В результате пришли к выводу, что испытания следует отложить до тех пор, пока не появятся самообучающиеся компьютеры (работающие с помощью нейронных сетей) [22].

На руднике Kiruna (LKAB, Швеция), чтобы компенсировать спад производительности на основном гор. –1045 м (после 2015 г.) в эксплуатацию ввели гор. –1365 м. На новом горизонте компания Mirdroc Electric в 2012 г. начала реализацию проекта полностью автоматизированной электровозной откатки руды.

Использованы 9 поездов Schalke (Германия) и вагонетки Nordic Minesteel Technologies (NMT) (Канада). Длина транспортирования составила около 14 км. Погрузка руды (из 27 погрузочных станций), перемещение (со скоростью 15 км/ч) и разгрузка (в 4 пунктах) происходят в автономном режиме. Проектная производительность откатки составляет 110 тыс. т/сут. (30 млн т руды в год в течение 20 лет), режим работы – круглогодично, 24 часа в сут [29]. Длина состава может составлять от 65 м (при 1 локомотиве) до 115 м (при двух локомотивах), а масса – от 160 до 1200 т (например, на гор. –1045 м работает 24 вагона с грузоподъемностью состава 550 т) [30, 31]. Одним из важных технических решений был переход на ширину колеи 1435 мм (ранее применялось 891 мм), что позволило снизить расходы на ремонт и уменьшить просыпь руды при автоматической погрузке. В качестве системы управления используется программа Bombardier Interflo 150 (Швеция) [29]. На рельсах устанавливаются специальные метки, позволяющие контролировать безопасную скорость и расстояние между составами, автоматизировать прохождение поездами перекрестков. Стоимость проекта автоматизации – 1,92 млрд долл. США, строительство закончилось в 2017 г. Предварительное сравнение показало, что, несмотря на значительные капитальные вложения, автоматизация электровозной откатки на гор. –1365 м позволяет снизить предполагаемые эксплуатационные затраты относительно автомобильного (на 70 %) и конвейерного видов транспорта. Отчасти это достигается реализацией новой стратегии компании Schalke, заключающейся в оснащении локомотивов многомодульными дизель-аккумуляторными и электрическими силовыми установками (взаимозаменяемыми менее чем за 1 ч) ModuTrac и поэтапном развитии транспортной инфраструктуры. С ростом количества поездов растет количество погрузочно-разгрузочных станций, уровня автоматизации. На рис. 6 видно, что, в отличие от традиционной схемы транспортирования, где уже в момент начала работ применяются электровозы, строится основная инфраструктура с контактным проводом и т. д. Стратегия Schalke предполагает первоначальное использование тепловозов (на дизельном топливе) и минимальную инфраструктуру [32]. По мере развития производительности развивается инфраструктура и, когда рудничная вентиляционная сеть перестает справляться с проветриванием рудника, осуществляется переход на аккумуляторную силовую установку (со встроенной системой работы от контактного провода для перемещения по магистральным участкам). Аналогичные системы автоматизации внедрены на рудниках Grasberg (Freeport-McMoRan, Индонезия) и El Teniente (Чили, Codelco) [33, 34].

Комплексная роботизация «Индустрия 4.0» (5-й уровень). Термин «Индустрия 4.0» был введен правительством Германии в 2011 г. и стал синонимом термина «цифровая трансформация традиционных производственных процессов». По прогнозам, реализация программы «Индустрия 4.0» будет развиваться по девяти базовым направлениям (рис. 7).

Реализация проекта подразумевает создание «умной» взаимоувязанной промышленности. В частности, в Китае на медно-цинковом руднике Fankou (Zhongjing Lingnan Nonferrous Metals) была протестирована интеллектуальная система добычи полезных ископаемых. Протестированы центральное управление оборудованием, высокоскоростная связь и автономная работа очистного комбайна, автосамосвала, зарядной установки, буровых установок для бурения шпуров и скважин. Получены положительные промышленные результаты в различных режимах работы оборудования, а также удалось добиться определения местоположения работающей техники с точностью до 100 мм [35]. На угольных шахтах Tang Shan Gou и Nan Liang с мощностью пластов 1–1,7 м используется полностью безлюдная выемка. Для реализации этого проекта в период 2006–2016 гг.

немецкая компания EEP Elektro-Elektronik Pranjic поставила и ввела в эксплуатацию более 60 комплектов современного автоматического управления. Наблюдение за работой комбайнов ведется с помощью камер (в реальном масштабе времени с передачей сигнала по оптическому волокну). Как правило, подземный персонал требуется только для контролирования процесса добычи и при выполнении ремонта. Автоматизация позволила улучшить систему безопасности и экономические показатели [36].

Рис. 7. Базовые направления реализации программы «Индустрия 4.0»

Fig. 7. Reference directions in Industry 4.0 program implementation

Одним из первых в мировой горнодобывающей промышленности встал на путь цифровой трансформации австро-английский концерн Rio Tinto, запустивший в 2008 г. программу Mine of the Future, направленную на поиск передовых технологий добычи на больших глубинах, обеспечивающих повышение экологической и промышленной безопасности производства [37]. Помимо больших глубин участие человека в производственных процессах осложняется невероятной жарой (зафиксирован мировой рекорд температуры не менее 37,8 °C в течение 160 дней). Программа реализуется на рудниках, расположенных в регионе Пилбара Западной Австралии. В рамках программы внедрена самая крупная в мире автономная система автоперевозок (более 80 автосамосвалов на 2017 г. с ростом до 140 единиц к 2019 г.). Управление работой большинства автономных систем осуществляется в едином операционном центре в г. Перт, расположенном на расстоянии около 1500 км. В 2008 г. система автономного бурения внедрена на руднике West Angeles, где в период до 2018 г. 11 автономными станками пробурено более 5000 км скважин. Бурение полностью автоматизировано, а 1 оператор контролирует работу до 4 буровых установок. Для повышения точности бурения используется технология 3D-визуализации RTVis [38]. В 2017 г. автоматизирована система железнодорожных перевозок (аккредитованная Национальным управлением безопасности железных дорог Австралии), именуемая AutoHaul. Первоначально в кабине локомотива для контроля находился 1 машинист, а с 2018 г. поезда работают полностью автономно (около 200 поездов – 65 % от всего парка) и объединяют 16 рудников и 4 портовых терминала с годовым грузопотоком 330 млн т руды. Автоматизация железнодорожного транспорта позволила существенно увеличить пропускную способность (работа 365 дней в году и 24 часа в сутки) и снизить стоимость железнодорожных перевозок. Кроме того, за счет расширения инфраструктуры уменьшился пробег автотранспорта на 1,5 млн км. По данным отчета Deloitte Access Economics, 1 грузовой поезд замещает 110 автосамосвалов, позволяет снизить стоимость транспортирования на 1,45 цента на т-км и в 16 раз снизить выбросы углерода в атмосферу [38, 39].

В России, как и за рубежом, предпринимаются первые попытки создания «умного» производства. В частности, компания АО «Вист-групп» уже несколько лет работает над проектом «Интеллектуальный карьер», включающим в себя системы предупреждения столкновений, контроля качества и диагностики оборудования, качества дорог, полезного ископаемого, систему управления БВР на основе высокоточной навигации, дистанционно управляемое оборудование и др. Этапы реализации проекта следующие: первый – роботизированная перевозка автосамосвалами по фиксированному маршруту между стационарными пунктами погрузки-разгрузки, на втором этапе происходит замена стационарных пунктов на реально работающие экскаваторы на ручном управлении и пункты разгрузки, на третьем этапе применяются дистанционное управление экскаваторами, погрузчиками, бульдозерами и другой техникой. Основой является автоматизированная система управления горнотехническим комплексом (АСУ ГТК) «Карьер» [40].

Как показывает практика работы зарубежных компаний-лидеров в области автоматизации горных работ, к вопросу внедрения цифровых и беспилотных технологий необходимо подходить комплексно, исключая формирование отдельных «островов автоматизации» (закключающееся в том, что на горнодобывающем предприятии имеется большое количество независимого оборудования и различных систем, которые имеют свои, не связанные в единую систему, информацию и интерфейсы). Основа комплексной автоматизации – это объединение множества процессов – от добычи, обогащения до различных вспомогательных операций – в единую информационно-технологическую цепочку, где рудник – это часть горно-обогажительного комбината. Связующим звеном для всех автоматизированных процессов будет являться единая информационная система, обеспечивающая двусторонний обмен информацией.

Закключение. В работе выполнен анализ эволюции и опыта автоматизации основных производственных процессов при подземной и комбинированной разработке более 30 рудников и шахт, таких как рудники «Молодежный» и «Учалинский» (ОАО «Учалинский ГОК»), «Рудник № 6» (ПАО «ППГХО»), «Октябрьский» (ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель»), «Кировский» и «Расвумчорпский» (КФ АО «Апатит»), «Удачный» и «Айхал» (АК «Алроса»), Diavik, Glencore Kidd, Northparkes и West Angeles (Rio Tinto), Kiruna и Malberget (LKAB), Olympic Dam (BHP Billiton), Finsch (De Beers), Pipe Norte, Diablo Regimiento, Andina, El Teniente (Codelco), Stobie и Creighton (INCO), Outokompo (Kemi mine), Xstrata (Brunswick), Grasberg (Freeport-McMoRan), Fankou (Zhong jing Lingnan Nonferrous Metals), угольные шахты Tang Shan Gou и Nan Liang. Были проанализированы попытки автоматизации различных уровней сложности, начиная от 1-го уровня – дистанционного управления отдельными процессами в пределах прямой видимости до 5-го – комплексной роботизации взаимосвязанных технологических процессов («Индустрия 4.0»).

В результате проведенного исследования можно сделать выводы, что 1-й уровень находит свое применение преимущественно для работы ПДМ в опасных условиях и не позволяет значительно повысить производительность и безопасность горных работ. Наибольшее распространение получили системы 2-го и 3-го уровней, реализованные в основном при уборке горной массы, работе ПДМ, бурении шпуров и скважин, транспортировании руды автомобильным транспортом. При этом опыт работы показывает, что в настоящее время при работе ПДМ наиболее эффективна комбинация 2-го и 3-го уровней. Основные преимущества, полученные в ходе промышленных испытаний, заключаются в возможности работы в межсменных перерывах, в загазованной среде и с большей скоростью движения, что позволило значительно увеличить производительность оборудования.

3-й уровень (ПУ) на многих рудниках позволил сократить количество рабочего персонала до 80 %, затраты на техобслуживание до 60 %, увеличить производительность до 30 %, уменьшить эксплуатационные расходы до 25 % и повысить срок службы техники до 45 %. Значительно уменьшилось влияние вредных и опасных факторов на персонал, находящийся в основном на поверхности рудника.

4-й уровень автоматизации в настоящее время имеет меньшее применение и в основном используется для работы транспортного звена: железнодорожный транспорт и автосамосвалы. Попытки автономной работы ПДМ показали трудности с заполнением ковша, что связано с неравномерной крупностью и различными физическими свойствами отбитой горной массы, обуславливающими необходимость ручной настройки оборудования.

Значительное повышение эффективности работы следует искать в комплексной цифровизации и автономной работе всего предприятия, имеющего единый центр сбора информации, ее анализа и управления всеми технологическими процессами. Однако для отечественных предприятий ввиду специфики организационно-технических и социальных условий работы полностью безлюдная технология подземной добычи руд в ближайшей перспективе неосуществима. В настоящее время существуют попытки комплексной автоматизации, где несколько производственных процессов контролируются единой информационной системой. Однако для создания автономного «цифрового предприятия» требуется время и поэтапный переход всех производственных процессов на автономную работу на 4-м уровне.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Княгин В. Н. Цифровая трансформация компаний. Центр стратегических разработок «Северо-Запад», 2018. С. 5–6.
2. Плакиткин Ю. А., Плакиткина Л. С. Мировой инновационный проект «Индустрия 4.0» – возможности применения в угольной отрасли России. 1. Программа «Индустрия 4.0» – новые подходы и решения // Уголь. 2017. № 10. С. 44–50.
3. Четвертая промышленная революция. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Четвертая_промышленная_революция (дата обращения: 12.01.2020).
4. Горная энциклопедия. URL: <http://www.mining-enc.ru/k/kompleksnaya-mexanizaciya> (дата обращения: 12.01.2020).
5. Описание системы Rig Control System. URL: https://www.miningandenergy.ca/technology/article/atlas_corpos_new_rig_control_system_wins_international_design_excellence_aw/ (дата обращения: 11.10.2019).
6. LKAB Magazine. 2013. № 5. С. 18–19.
7. Практика опытно-промышленных испытаний технологий разработки рудных месторождений / Ю. А. Дик [и др.]. Екатеринбург: УрФУ, 2014. 480 с.
8. Нестеров Ю. В., Петрухин Н. П. Создание и развитие минерально-сырьевой базы отечественной атомной отрасли. М.: Атлант-С, 2017. 402 с.
9. Святецкий В. С., Кузьмин Е. В. Пастовая закладка выемочных камер на основе хвостов переработки урановых руд ПАО «ППГХО» // Технологии подземной разработки месторождений полезных ископаемых: матер. Междунар. конф. М., 2016. С. 4–6.
10. Дарбинян Т. П., Фендер С. Н., Гузанов П. С. Опыт внедрения камерных систем разработки при отработке медистых руд рудника «Октябрьский» // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2017. № 4(3). С. 121–125.
11. Горбачев С. А., Баландин В. В. Руднику «Октябрьский» – 40 лет // Горный журнал. 2014. № 4. С. 5–10.
12. Система шахтной беспроводной связи, позиционирования, передачи данных и потокового видео. Беспилотные электровозы. Беспилотные ПДМ. URL: <http://www.minesys.com> (дата обращения: 01.10.2019).
13. Lewis P. A., Clark L. M., Rowles S. J., Auld C. P., Petryshen C. M., Elderkin A. P. Sublevel retreat mining in the subarctic: a case study of the Diavik Diamond Mine // Proc. of the Fourth Internat. Symp. on Block and Sublevel Caving, Australian Centre for Geomechanics, Perth. 2018. P. 57–72.
14. Gustafson A. Automation of load haul dump machines. Luleå University of Technology. 2011. 56 p.
15. Jakubec J., Lagacé D., Boggis B., Clark L. M., Lewis P. A. Underground mining at Ekati and Diavik diamond mines // Proc. of the Fourth Internat. Symp. on Block and Sublevel Caving, Australian Centre for Geomechanics, Perth. 2018. P. 73–88.

16. Внедрение автоматизированного бурения глубоких скважин на КФ АО «Апатит». URL: <https://www.fertilizerdaily.ru/20180829-apatit-vnedryaet-distancionnoe-burenie-glubokix-skvazhin/> (дата обращения: 03.10.2019).
17. Хрищенко А. Б. Автоматизация производственных процессов КФ АО «Апатит» // МГПК БЕАР. 2018. URL: <http://conference.ncsi.ru> (дата обращения: 11.10.2019).
18. АЛРОСА автоматизирует буровые работы на подземных рудниках. URL: <http://www.alrosa.ru> (дата обращения: 11.08.2019).
19. Schweikart V., Soikkeli T. Codelco El Teniente – Loading automation in panel caving using AutoMine™ // Proc. of the 4th Int. Conference and Exhibition on Mass Mining, MassMin. 2004. P. 686–689.
20. Morton J. Underground drilling advances improve productivity, safety while cutting costs // WOMP. 2018. Vol. 01. URL: <http://www.womp-int.com> (дата обращения: 11.05.2020).
21. Casteel K. Underground haulage equipment trends // Engineering and Mining Journal. April 2008. P. 773–775.
22. McHugh C. Introduction of Autonomous loaders to Olympic Dam operations // Australia. Proc. of the 4th Int. Conference and Exhibition on Mass Mining. 22–25 August. Santiago. Chile. 2004. P. 692–695.
23. Кузьмин Е. В., Баранов А. В. Освоение автоматически управляемых комплексов при добыче кимберлитовых руд // ГИАБ. 2010. № 18. С. 355–361.
24. Raymond Groblerl, Danie Burger. Autonomous loading & hauling technology at De Beers Finsch mine // Rise of the machines. P. 1–9.
25. World's most automated underground mine. URL: <http://www.northparkes.com/improvement/worlds-most-automated-underground-mine> (дата обращения: 11.12.2019).
26. World Mining Equipment. URL: <http://www.infomine.com/news/newsletters/websites/editorials/suppliers/00078.htm> (дата обращения: 11.10.2018).
27. Larsson J., Appelgren J., Marshall J. A., Barfoot T. D. Atlas Copco infrastructureless guidance system for high-speed autonomous underground tramming // Proceedings of the 5th Int. Conference and Exhibition on Mass Mining, MassMin. Luleå, Sweden. 2008. P. 585–594.
28. Hedman A. Automatic machines: present and future loading and transportation equipment in the mining industry. M. Sc. thesis 1998, Luleå University of Technology, Sweden. 208 p.
29. INTERFLO 150 – KIRUNA MINE. Optimising the movement of iron ore. URL: http://www.infrasig.net/media/86275/08393_interflo_150_signalling_cs_lores.pdf (дата обращения: 11.06.2020).
30. Automated standard-gauge mine railway opens. URL: <https://www.railjournal.com/freight/automated-standard-gauge-mine-railway-opens-in-kiruna-sweden/> (дата обращения: 05.06.2020).
31. Remote controlled locomotives 1000 meters under ground. URL: <http://www.akerstroms.com/UserFiles/Archive/646/LKABcustomcase.pdf> (дата обращения: 11.07.2020).
32. Merchiers A., Brudek G., Dammers M. Advantages and applications of rail haulage systems in underground hard rock mining operations // Mining Report 151 (2015). No. 5. P. 400–416.
33. Large international order for the mining segment. URL: <http://smtg.se/large-international-order-for-the-mining-segment/> (дата обращения: 03.06.2020).
34. Norma Vargas. Automation and interoperability in mining processes, 2017. URL: <http://gmgroup.org/download/108/presentations/.../codelco.pdf> (дата обращения: 05.06.2020).
35. Jian-guo Li., Kai Zhan. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment // Engineering. 2018. No. 4. P. 381–391.
36. Ганг Сонг. Опыт внедрения автоматизации процессов подземной добычи угля на примере китайской угольной промышленности // Уголь. 2016. № 2. С. 25–29.
37. Mine of the Future. URL: <http://www.riotinto.com/australia/pilbara/mine-of-the-future-9603.aspx> (дата обращения: 05.06.2020).
38. Sokolov I., Misharin A., Kupriyanovsky V., Pokusaev O., Larin O. The digital economy of Western Australia – smart mining, oil, gas enterprises, railways, seaports, and formalized ontologies // International Journal of Open Information Technologies. 2018. Vol. 6. No. 6. P. 44–62.
39. Австралийские власти одобрили автоматизированные поезда «Rio Tinto». URL: http://metallicheskiy-portal.ru/news/2018/5/20/avstraliiskie_vlasti_odobrili_avtomatizirovannye_poezda_rio_tinto (дата обращения: 11.06.2020).
40. Палаткин Ю. А., Палаткина Л. С. Программы «Индустрия-4.0» и «Цифровая экономика Российской Федерации» – возможности и перспективы в угольной промышленности // Горная промышленность. № 1(137). 2018. С. 22–28.

Поступила в редакцию 9 октября 2020 года

Сведения об авторах:

Громов Евгений Викторович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Горного института Кольского научного центра РАН, доцент кафедры горного дела, наук о Земле и природообустройства Мурманского арктического государственного университета. E-mail: evgromov@list.ru

Digital transformation of underground mining flow processes: post-event analysis and world's experience

Evgenii V. Gromov^{1,2}

¹ Mining Institute of the Kola Science Center RAS, Apatity, Russia.

² Murmansk Arctic State University, Apatity, Russia.

Abstract

Introduction. The article presents the stages of underground mining transfer from mechanization to automation of basic production processes. Experience of applying various automation levels in local and foreign enterprises has been considered in details.

Methodology. The advantages and disadvantages of introducing the digital technologies have been analyzed at almost 30 mines and shafts with underground and integrated methods of mining.

Results. It has been determined that in the present time, semiautomatic and autonomous control over particular production processes has become a frequent practice. Main advantages revealed in the course of field trials consist in the ability to operate in inter-shift breaks, in gassy environment, and in higher speed of equipment travel which has made it possible to significantly improve performance. In many mines the staff has been reduced down to 80%, maintenance capital has been reduced down to 60%, performance improved up to 30%, operating costs reduced down to 25%, and service time improved up to 45%. The effect of harmful and hazardous factors on the personnel has significantly reduced due to their occupation mainly in the surface of the mine.

Summary. Significant improvement in the efficiency of operation is due to the integrated digitalization and autonomous operation of the whole enterprise which has a single center of information accumulation, data analysis and the flow processes control. It takes time to create an autonomous "digital enterprise" as well as step by step transfer of all production processes in the autonomous operating mode.

Key words: digital transformation; Industry 4.0; automation; robotization; underground mining; flow processes.

REFERENCES

1. Kniagin V. N. *Digital transformation in business*. Center for Strategic Research North-West Publishing; 2018. (In Russ.)
2. Plakitkin Iu. A., Plakitkina L. S. The Industry-4.0 global innovation project's potential for the coal industry of Russia. 1. Industry-4.0 program – new approaches and solutions. *Ugol = Coal*. 2017; 10: 44–50. (In Russ.)
3. *The Fourth Industrial Revolution*. Available from: [https://ru.wikipedia.org/wiki/ Четвертая_промышленная_революция](https://ru.wikipedia.org/wiki/Четвертая_промышленная_революция) [Accessed 12 January 2020].
4. *Mining encyclopedia*. Available from: <http://www.mining-enc.ru/k/kompleksnaya-mexanizaciya> [Accessed 12 January 2020].
5. *Rig Control System*. Available from: https://www.miningandenergy.ca/technology/article/atlas_copcos_new_rig_control_system_wins_international_design_excellence_aw/ [Accessed 11 October 2019].
6. *LKAB Magazine*. 2013; 5: 18–19.
7. Dik Iu. A. (ed.) *Pilot testing of technologies for ore deposits development*. Ekaterinburg: UrFU Publishing; 2014. (In Russ.)
8. Nesterov Iu. V., Petrukhin N. P. *Creation and development of the mineral resource base of the domestic nuclear industry*. Moscow: Atlant-S Publishing; 2017. (In Russ.)
9. Sviatetskii V. S., Kuzmin E. V. Pastel backfill of stopes based on PIMCU, PJSC uranium ore mill tailings. In: *Technologies of underground mining: Proceedings of the Internat. Conf.* Moscow; 2016. (In Russ.)
10. Darbinian T. P., Fender S. N., Guzanov P. S. Experience of cupriferous ore mining by open stoping in Oktyabrsky mine. *Fundamentalnye i prikladnye voprosy gornykh nauk = Basic and Applied Research Problems of the Mining Science*. 2017; 4(3): 121–125. (In Russ.)
11. Gorbachev S. A., Balandin V. V. The 40th anniversary of the Oktyabrsky mine. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2014; 4: 5–10. (In Russ.)
12. *The system of shaft wireless communication, positioning, data transfer and stream video. Unmanned electric locomotives. Unmanned LHD*. Available from: <http://www.minesys.com> [Accessed 01 October 2019].
13. Lewis P. A., Clark L. M., Rowles S. J., Auld C. P., Petryshen C. M., Elderkin A. P. Sublevel retreat mining in the subarctic: a case study of the Diavik Diamond Mine. In: *Proc. of the Fourth Internat. Symp. on Block and Sublevel Caving, Australian Centre for Geomechanics, Perth*. 2018. P. 57–72.
14. Gustafson A. *Automation of load haul dump machines*. Luleå University of Technology. 2011. 56 p.
15. Jakubec J., Lagacé D., Boggis B., Clark L. M., Lewis P. A. Underground mining at Ekati and Diavik diamond mines. In: *Proc. of the Fourth Internat. Symp. on Block and Sublevel Caving, Australian Centre for Geomechanics, Perth*. 2018. P. 73–88.
16. *Introducing automatic drilling of deep wells at Kirovsk Branch of Apatit*. Available from: <https://www.fertilizerdaily.ru/20180829-apatit-vnedryaet-distancionnoe-burenie-glubokix-skvazhin/> [Accessed 03 October 2019].
17. Khrishcheniuk A. B. *Production process automation at Kirovsk Branch of Apatit. IMIC-BEAR-2018*. Available from: <http://conference.ncci.ru> [Accessed 11 October 2019].

18. *ALROSA introduces automation into drilling in underground mines*. Available from: <http://www.alrosa.ru> [Accessed 11 August 2019].
19. Schweikart V., Soikkeli T. Codelco El Teniente – Loading automation in panel caving using AutoMine™. In: *Proc. of the 4th Int. Conference and Exhibition on Mass Mining, MassMin. 2004*. P. 686–689.
20. Morton J. Underground drilling advances improve productivity, safety while cutting costs. *WOMP*. 2018; 01. Available from: <http://www.womp-int.com> [Accessed 11 May 2020].
21. Casteel K. Underground haulage equipment trends. *Engineering and Mining Journal*. April 2008. P. 773–775.
22. McHugh C. Introduction of Autonomous loaders to Olympic Dam operations. *Australia. Proc. of the 4th Int. Conference and Exhibition on Mass Mining. 22–25 August. Santiago. Chile. 2004*. P. 692–695.
23. Kuzmin E. V., Baranov A. V. Automation technology in the kimberlite underground mining. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2010; 18: 355–361. (In Russ.)
24. Raymond Groblerl, Danie Burger Autonomous loading & hauling technology at De Beers Finsch mine. *Rise of the machines*. P. 1–9.
25. *World's most automated underground mine*. Available from: <http://www.northparkes.com/improvement/worlds-most-automated-underground-mine> [Accessed 11 December 2019].
26. *World Mining Equipment*. Available from: <http://www.infomine.com/news/newsletters/websites/editorials/suppliers/00078.htm> [Accessed 11 October 2018].
27. Larsson J., Appelgren J., Marshall J. A., Barfoot T. D. Atlas Copco infrastructureless guidance system for high-speed autonomous underground tramming. In: *Proceedings of the 5th Int. Conference and Exhibition on Mass Mining, MassMin. Luleå, Sweden. 2008*. P. 585–594.
28. Hedman A. *Automatic machines: present and future loading and transportation equipment in the mining industry*. M. Sc. thesis 1998, Luleå University of Technology, Sweden. 208 p.
29. *INTERFLO 150 – KIRUNA MINE. Optimising the movement of iron ore*. Available from: http://www.infrasig.net/media/86275/08393_interflo_150_signalling_cs_lores.pdf [Accessed 11 June 2020].
30. *Automated standard-gauge mine railway opens*. Available from: <https://www.railjournal.com/freight/automated-standard-gauge-mine-railway-opens-in-kiruna-sweden/> [Accessed 05 June 2020].
31. *Remote controlled locomotives 1000 meters under groun*. Available from: <http://www.akerstroms.com/UserFiles/Archive/646/LKABcustomcase.pdf> [Accessed 11 July 2020].
32. Merchiers A., Brudek G., Dammers M. Advantages and applications of rail haulage systems in underground hard rock mining operations. *Mining Report 151 (2015)*. No. 5. P. 400–416.
33. *Large international order for the mining segment*. Available from: <http://smtg.se/large-international-order-for-the-mining-segment/> [Accessed 03 June 2020].
34. Norma Vargas. *Automation and interoperability in mining processes, 2017*. Available from: <http://gmgroup.org/download/108/presentations/.../codelco.pdf> [Accessed 05 June 2020].
35. Jian-guo Li., Kai Zhan. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment. *Engineering*. 2018; 4: 381–391.
36. Song Gang. Experience in the implementation of process automation and data communication for underground coal mining on the example of China's coal industry. *Ugol = Coal*. 2016; 2: 25–29.
37. *Mine of the Future*. Available from: <http://www.riotinto.com/australia/pilbara/mine-of-the-future-9603.aspx> [Accessed 05 June 2020].
38. Sokolov I., Misharin A., Kupriyanovsky V., Pokusaev O., Larin O. The digital economy of Western Australia – smart mining, oil, gas enterprises, railways, seaports, and formalized ontologies. *International Journal of Open Information Technologies*. 2018; 6 (6): 44–62.
39. *Australian authorities approved «Rio Tinto» autonomous trains*. Available from: http://metallischekiy-portal.ru/news/2018/5/20/avstraliiskie_vlasti_odobrili_avtomatizirovannie_poezda_rio_tinto [Accessed 11 June 2020].
40. Palatkin Iu. A., Palatkina L. S. Programs industry-4.0 and digital economy of the Russian Federation – opportunities and horizons in the coal sector. *Gornaia promyshlennost = Mining Industry*. 2018; 1(137): 22–28. (In Russ.)

Received 9 October 2020

Information about authors:

Evgenii V. Gromov – PhD (Engineering), senior researcher, Mining Institute of the Kola Science Center RAS, associate professor of the Department of Mining, Earth Sciences and Environmental Management, Murmansk Arctic State University. E-mail: evgromov@list.ru

Для цитирования: Громов Е. В. Цифровая трансформация технологических процессов подземных горных работ: ретроспективный анализ и мировой опыт // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 8. С. 90–108. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-8-90-108

For citation: Gromov E. V. Digital transformation of underground mining flow processes: post-event analysis and world's experience. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 8: 90–108 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-8-90-108