

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 330.356.3

DOI: 10.26730/2587-5574-2022-3-60-77

СТАНОВЛЕНИЕ МАЙНИНГА 4.0 КАК ОТРАСЛЕВОЙ ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ИНДУСТРИИ 4.0 В СВЕТЕ ДОСТИЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА

Жиронкина О.В.

Кемеровский государственный университет

**Информация о статье**

Поступила:

12 Сентября 2022 г.

Одобрена после рецензирования:

14 Октября 2022 г.

Принята к публикации:

26 Октября 2022 г.

Ключевые слова: Индустрия 4.0, технологический суверенитет, Майнинг 4.0, экономика добывающего сектора, искусственный интеллект

Аннотация.

Технологическая трансформация промышленности имеет место как в передовых, так и в догоняющих странах и затрагивает не только высокотехнологичные и обрабатывающие, но и добывающие отрасли экономики. Развитие российской экономики в условиях технологических ограничений и санкций может осуществляться с опорой на собственные источники НИОКР. Инновационно-технологические ресурсы, определяющие передовой край роста производительности труда и национальный технологический суверенитет, сегодня происходят из платформы Индустрии 4.0. Применительно к минерально-сырьевому комплексу такие технологии воплощены в Майнинге 4.0. Формирование ядра отраслевой инновационной технологической платформы добывающих отраслей – Майнинга 4.0 – является предметом настоящего исследования. Гипотеза, заложенная в его основу, состоит в том, что формирование ядра инновационных технологий, преобразующих добывающий сектор, образовано «сквозными» технологиями, распространяющимися и на обрабатывающий и высокотехнологичный сектора экономики. Поэтому только их синхронная модернизация может содействовать достижению технологического суверенитета. Для раскрытия ядра технологий Майнинга 4.0 необходимо выделить те из них, которые являются «сквозными» для добывающего и обрабатывающего комплекса и наиболее чувствительными для технологического суверенитета.

Для цитирования: Жиронкина О.В. Становление Майнинга 4.0 как отраслевой инновационной технологической платформы Индустрии 4.0 в свете достижения технологического суверенитета // Экономика и управление инновациями. 2022. № 3 (22). С. 60-77. DOI: 10.26730/2587-5574-2022-3-60-77

ESTABLISHMENT OF MINING 4.0 AS AN INDUSTRY INNOVATIVE TECHNOLOGICAL PLATFORM OF INDUSTRY 4.0 IN THE LIGHT OF ACHIEVING TECHNOLOGICAL SOVEREIGNTY

Olga V. Zhironkina

Kemerovo State University

**Article info**

Submitted:

12 September 2022

Approved after reviewing:

14 October 2022

Abstract.

Technological transformation of industry takes place both in advanced and catching up countries, and affects not only high-tech and manufacturing, but also extractive sectors of the economy. The development of the Russian economy in the context of technological restrictions and sanctions can be based on its own sources of R&D. The innovation and technology resources that define the cutting edge of productivity growth and national technological sovereignty today come from the Industry 4.0 platform. With regard to the mineral resource complex, such technologies are embodied in Mining 4.0. The formation of the core of the sectoral innovative technological platform of the extractive industries (Mining 4.0) is the subject of this study.

Accepted for publication:
26 October 2022

Keywords:
Industry 4.0, technological sovereignty, Mining 4.0, mining economy, artificial intelligence.

The hypothesis underlying it is that the formation of the core of innovative technologies that transform the extractive sector is formed by "cross-cutting" technologies that extend to the manufacturing and high-tech sectors of the economy. Therefore, only their synchronous modernization can contribute to the achievement of technological sovereignty. To reveal the core of Mining 4.0 technologies, it is necessary to single out those that are "end-to-end" for the mining and processing complex, and the most sensitive to technological sovereignty.

For citation: Zhironkina O.V. Establishment of Mining 4.0 as an industry innovative technological platform of Industry 4.0 in the light of achieving technological sovereignty. *Economics and Innovation Management*, 2022, no. 3 (22), pp. 60-77. DOI: 10.26730/2587-5574-2022-3-60-77

1 Introduction / Введение

Для развития добывающего сектора российской экономики технологический суверенитет есть основа фундаментальной устойчивости ресурсного обеспечения отечественной промышленности, который можно рассматривать как дополнительный эквивалент стоимости извлекаемого сырья. Нельзя не согласиться с С.Г. Ковалевым, Р.В. Мамедовым в том, что в настоящее время отсутствуют страны, полностью независимые от международного рынка технологий, современного оборудования и ноу-хау [1, 2]. Тем не менее, Д. Песков прямо указывает на то, что: «...условием выживания в прямом смысле этого слова любой крупной страны в ближайшие десятилетия будет достижение этой страной технологического суверенитета» [3].

Сегодня мировая добывающая промышленность находится в процессе технологической трансформации, поскольку цифровые и безлюдные роботизированные технологии преобразуют традиционную технологию добычи полезных ископаемых – как открытую, так и подземную. В условиях нестабильного мирового спроса на сырье, растущих требований к безопасности труда, ужесточения экологического законодательства и сокращающейся прибыли горнодобывающая промышленность должна повышать свою производительность за счет внедрения интеллектуальных систем добычи с тем, чтобы выжить на конкурентном рынке.

Благодаря технологической платформе Четвертой промышленной революции (Индустрии 4.0) [4] в ближайшие десятилетия объемы добычи на каждой шахте, разрезе или руднике будут гибко меняться в зависимости от мировых цен и спроса. То есть будущая добыча полезных ископаемых станет производным значением от глобальных цен, определяемых международной конкуренцией. Это особенно важно в условиях колебаний цен на сырье и стагнации производительности труда в минерально-сырьевом комплексе (Рис. 1).



Рис. 1. Мировые цены на твердые полезные ископаемые и производительность труда в минерально-сырьевом комплексе (индекс, 2008 г. – 100%)

Fig. 1. World prices for solid minerals and labor productivity in the mineral resource complex (index, 2008 is 100%)

Построено по данным: [5].

Данные Рис. 1 свидетельствуют об аккумулированной потребности повышения производительности труда в минерально-сырьевом секторе, динамика которой отстает от роста цен на сырье в 2018-2021 гг. Удовлетворение этой потребности видится возможным за счет диффузии технологий Четвертой промышленной революции в базовые отрасли.

Майнинг 4.0 есть результат отраслевой диффузии инновационных технологий Индустрии 4.0 в ходе структурного сдвига в экономике, обусловленного перетоком капитала из базовых отраслей в высокотехнологические, и обратного массового трансфера инноваций. Майнинг 4.0 ассоциируется с добывающим сектором, тогда как в других отраслях промышленности ряд авторов выделяет такие платформы, как Энергия 4.0, Транспорт 4.0, Нефть и Газ 4.0, Материалы 4.0 [6-8]. В соответствии с рыночным подходом разработчиков Национальной технологической инициативы достижения Индустрии 4.0 воплощаются в новых отраслевых рынках, таких как EnergyNet, TechNet, NeuroNet, EduNet, EcoNet и пр. [9].

В соответствии с таким подходом качественным признаком Майнинга 4.0 является перемещение технологической платформы Индустрии 4.0 в базовый сектор экономики – отрасли добычи полезных ископаемых (главным образом) и производства энергии (опосредованно). Следовательно, в рамках данного подхода Майнинг 4.0 связан с диффузией таких «сквозных» инноваций, как глубокая цифровизация добычи полезных ископаемых (Интернет Вещей, Цифровые Двойники, Большие Данные и Облачные Вычисления, Умные Сенсоры, 3D-визуализация и проектирование, Поточная Вычислительная Динамика, Блокчейн и Нейросети), роботизация и экспансия безлюдных удаленно управляемых процессов.

2 Materials and Methods / Материалы и методы

Майнинг 4.0 является логичным этапом эволюции технологической платформы добывающих отраслей минерально-сырьевого комплекса (Табл. 1) [10-11].

Таблица 1. Эволюция инновационных технологий в добывающих отраслях

Table 1. Evolution of innovative technologies in the extractive industries

Временной период технологического развития геотехнологии	Этап технологического развития	Технологии ядра отраслевых инноваций
1790–1850 гг.	Майнинг 1.0	Механизация вспомогательных процессов
1860–1940 гг.	Майнинг 2.0	Механизация основных процессов
1950–1990 гг.	Майнинг 3.0	Оборудование высокой удельной мощности, аналоговая телеметрия
2000 гг. – н.в.	Майнинг 4.0	Безлюдные технологии, удаленные цифровые сенсоры, «умные» роботы

Из Табл. 1 следует, что еще в конце 1990-х гг., в эпоху технологий Майнинга 3.0, было предвидение доминирования «подключенных» горных машин и приборов к 2030 г. Цифровая трансформация является эталоном технологического перехода к Майнингу 4.0, поскольку позволяет запустить новую систему управления процессами и операциями в добыче полезных ископаемых и их переработке. Если до настоящего момента технологии Майнинга 3.0 радикально расширяли возможности человека, наделив его высокопроизводительным оборудованием, то цифровые технологии Майнинга 4.0 ведут к конвергенции человека и машины [12]. В результате такой технологической конвергенции влияние человеческого фактора на функционирование добывающих предприятий значительно снижается, поскольку часть процесса анализа и принятия решений переходит под контроль цифровых систем. Особое значение это приобретает для развивающихся стран, в которых компетенции горных инженеров стремительно меняются [13].

Существует мнение относительно перспектив применения технологий Индустрии 4.0 в Майнинге – безальтернативный путь развития минерально-сырьевого комплекса. Это подразумевает, что до 90% полезных ископаемых в мире к 2050 г. будет добываться на платформе Майнинга 4.0, при этом интеграция цифровых технологий, автоматизированного и автономного оборудования дает ключ к решению не только производственно-экономических, но и экологических, социальных проблем, с которыми сегодня сталкивается ресурсный сектор [14].

Таблица 2. Концепция Майнинга 4.0 в системе инновационной технологической платформы Индустрии 4.0

Table 2. The concept of Mining 4.0 in the system of the innovative technological platform Industry 4.0

Инновации	Сферы применения	Слабые стороны	Преимущества
Автономные (безлюдные) машины	Опасные зоны шахт и карьеров	Высокие затраты на внедрение, сокращение рабочих мест, потребность в особых компетенциях работников	Нулевые риски и несчастные случаи, сокращение непредвиденных затрат, рост производительности
Мониторинг оборудования в реальном времени	Горные машины и оборудование	Высокие затраты на внедрение, потребность в особых компетенциях работников	Контроль надежности оборудования, быстрая реакция на угрозы повреждения
Большие данные	Данные горных и транспортных машин, горных выработок	Огромный объем обрабатываемых данных, потребность в передовых аналитических инструментах	Постоянный контроль параметров в реальном времени, совершенствование организации работы
Облака данных	Цифровые клоны геологических участков, горных работ и оборудования	Кибератаки, потребность в постоянной ИТ-поддержке, высокие затраты на обслуживание	Возможность удаленного взаимодействия подразделений, систематизированные данные, открытый доступ к данным
Умные датчики	Надежность оборудования и безопасность людей	Высокие затраты на обслуживание, сложные условия внедрения, технические ограничения	Точные измерения, постоянный контроль возможности точного прогнозирования событий
Носимые цифровые датчики	Контроль местоположения работников	Высокие затраты на внедрение, соблюдение прав сотрудников, частые несогласия со стороны персонала	Высокая безопасность труда, более быстрая идентификация сотрудников, постоянный контроль производительности
3D-моделирование	Виртуальное моделирование геологических участков и горных работ	Потребность в квалифицированном персонале, реорганизация работы технологической службы, необходимость массовых измерений	Точная горно-геологическая информация, удаленное взаимодействие между подразделениями
3D-сканирование	Устойчивость горных выработок	Высокая стоимость оборудования, организационные изменения работы, необходимость дополнительного обучения	Повышение эффективности и безопасности горных работ
Геоинформационные системы	Digital mapping of a mining company	Необходимость сбора, обработки и анализа большого объема данных, высокие затраты на внедрение и обслуживание, необходимость создания дополнительных рабочих мест	Точность и онлайн-доступность горной документации, преобразование аналоговых документов в цифровые
Виртуальная или дополненная реальность	Профессиональное обучение работников, техобслуживание машин	Высокая стоимость, ограниченный ресурс оборудования, необходимость повышения квалификации персонала	Ограничение человеческого фактора, автоматический контроль работы, подготовка работников к нестандартным ситуациям
Кибербезопасность	Цифровые системы	Необходимость постоянного обновления, высокие затраты на обслуживание, угрозы фишинга	Защита данных, контроль автоматизации процессов майнинга, удаленная помощь и контроль
Цифровые двойники	Интеграция стационарных и мобильных компьютеров	Квалифицированный персонал, высокие затраты на внедрение, необходимость интеграции систем	Повышение эффективности управления, снижение затрат, возможность сотрудничества между компаниями

Построено по данным: [15-16].

Концепция Майнинга 4.0, сформулированная на основе Индустрии 4.0, основана на четырех столпах: объединении реального мира машин и виртуального мира Интернета в дополненной реальности, экстерриториальном доступе к любой информации «по запросу», практически безграничных возможностях распределенных облачных вычислений, искусственном интеллекте и нейронных сетях. Концепция Майнинга 4.0 предполагает, что благодаря четко определенным сферам использования различных инновационных технологий, учета достоинств и недостатков добывающие компании, опирающиеся на «сквозные» технологии Индустрии 4.0, получают максимальную гибкость и критические конкурентные преимущества (Табл. 2).

Табл. 2 может быть обобщена ключевым фактором влияния Индустрии 4.0 на становление Майнинга 4.0 – ростом производительности на порядок с каждым технологическим переходом (от Индустрии 1.0 к 2.0 и далее). До сих пор рост производительности сопровождался усилением нагрузки на окружающую среду, однако распространение Майнинга 4.0 посредством строительства «умных» шахт и карьеров, обогащательных фабрик способствует развитию бережного и зеленого производства. Вместе с тем по мере сокращения экологической опасности добычи полезных ископаемых в Майнинге 4.0 (т.н. «Зеленый Майнинг») возрастает проблема его кибербезопасности, характерная для производств Индустрии 4.0 в целом.

Наряду с упомянутыми выше качественными признаками, количественным признаком Майнинга 4.0 является ускорение роста добычи полезных ископаемых за счет технологически обусловленного роста производительности труда. Так, за 2000-2019 гг. мировые объемы добычи угля и цветных металлов выросли более чем вдвое, железной руды – втрое, строительных материалов – на одну треть [17].

Опираясь на выделенные количественные и качественные признаки, можно сделать вывод о том, что переход от предшествующей платформы добычи полезных ископаемых (Майнинг 3.0) к Майнингу 4.0 есть закономерный объективный процесс эволюции технологий. Если к началу 19 в. экспансия паровых машин, добыча угля для производства кокса (Индустрия 1.0) позволили механизировать вспомогательные процессы шахт и заводов (Майнинг 1.0), то к началу 20 в. достижения Индустрии 2.0 (электричество, поточные производства, двигатели внутреннего сгорания) привели к постепенной механизации основных процессов добычи и переработки полезных ископаемых (Майнинг 2.0).

Наиболее распространенная сегодня технологическая платформа добывающего сектора (Майнинг 3.0 с характерным оборудованием высокой удельной мощности, аналоговой телеметрией) получила распространение во второй половине 20 в. в ходе развития Индустрии 3.0 (продвинутые аналоговые и первые цифровые вычислительные и управляющие системы). Наряду с этим следует отметить роль Майнинга 4.0 в восстановлении престижа профессии горного инженера, которая перешла в арьергард к концу 20 в. по мере миграции добывающих кластеров из развитых в развивающиеся страны.

3 Results and discussion / Результаты и обсуждение

Развивающаяся цифровизация в горнодобывающей отрасли предлагает новые возможности для повышения производительности труда и в то же время может создать новые рабочие места с принципиально иным уровнем безопасности труда, сопоставимым с офисной работой. Многообразие форм, в которых протекает цифровизация в майнинге, обуславливает глубокие преобразования минерально-сырьевого сектора, обеспечивающие его конкурентоспособность в новых условиях.

Цифровое ядро Майнинга 4.0 не является сформировавшимся одномоментно, а есть результат эволюции человеческих компетенций использования программного обеспечения и физических контроллеров, а также повышения цифровой зрелости добычи и переработки полезных ископаемых. По мере перехода от использования программируемых контроллеров в отдельных механизмах к цифровым управляющим системам и далее к искусственному интеллекту цифровизация расширялась от отдельных процессов добычи полезных ископаемых к полной интеллектуализации технологической цепочки вплоть до их переработки с учетом рыночных цен и региональной специфики спроса. В результате концепция «умной шахты» предполагает сокращение растущей сложности организации производственных процессов, управление которыми происходит в «правильном времени», т.е. в требуемых времени и объеме. Вместе с тем цифровая зрелость действующих горнодобывающих предприятий значительно ниже, чем у обрабатывающих и даже

металлургических, и соответствует уровню Цифровизации 2.0 (Digital 2.0) по сравнению с Цифровизацией 4.0 (Digital 4.0), характерной для Майнинг 4.0 – Рис. 2 [18].

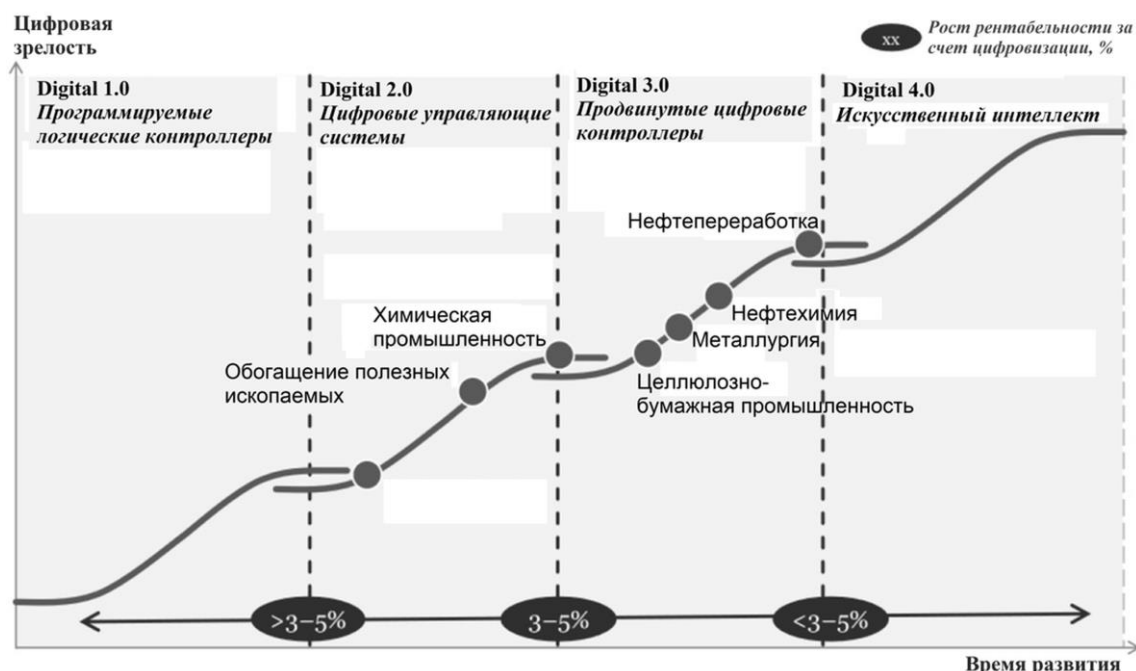


Рис. 2. Цифровая зрелость базовых отраслей применительно к Индустрии 4.0

Fig. 2. Digital maturity of basic industries in relation to Industry 4.0

Повышение цифрового технологического уровня минерально-сырьевого комплекса до уровня Цифровизации 4.0 при помощи Майнинга 4.0 заключается в использовании возможностей цифровизации для преобразования цепочки создания стоимости. Это будет обусловлено интеграцией процессов извлечения и переработки минеральных ресурсов в цифровые экосистемы, которые могут повысить производительность, снизить операционные затраты и повысить безопасность киберсистем и защищенность работников [19].

Широкое воздействие цифровых информационных технологий на добычу полезных ископаемых образует цифровую экосистему предприятия, которая включает цифровые двойники, интеллектуализацию, консольную визуализацию и роботизацию всех элементов цепочки поставок и процессов. Реальная конфигурация горнодобывающей цифровой экосистемы зависит от соединения и рекомбинации в ней интерактивных информационных систем отдельных процессов, таких как добыча, транспортировка и переработка полезных ископаемых, материальная логистика, вентиляция, обеспечение электроэнергией и пр.

В развитии цифровой экосистемы Майнинга 4.0 наблюдается проблема недостаточной унификации программного обеспечения разных производителей и затруднений их системной интеграции. Архитектура цифровой экосистемы в майнинге имеет доменную структуру, интегрирующую IT-системы, разработанные разными поставщиками (например, ABB – производственные решения, OSIsoft – интеграция данных из различных систем, IBM Maximo – решения для управления активами, Microsoft Azure – оперирование облачными данными, Microsoft Dynamics 365 – управление клиентскими связями, Microsoft Power BI – интегрированный бизнес-анализ). Эти информационные системы имеют technology stack and data formats, поэтому одна система может взаимодействовать с другой системой того же поставщика, но обменивается данными с программными продуктами других поставщиков при помощи Microsoft Excel, что снижает общую эффективность экосистемы [20].

«Сквозная» роль технологий Майнинга 4.0 заключается в цифровой трансформации минерально-сырьевого сектора в целом во многом связана с активными исследованиями в области управления динамичными многокомпонентными объектами в режиме реального времени. Это позволяет системам управления, основанным на искусственном интеллекте, взять под контроль

взаимосвязанные процессы в добыче и транспортировке полезных ископаемых и добиться высокого уровня оптимизации. Контроллеры, применяемые в таких системах управления, используют новый алгоритм управления транспортным потоком (Flight Control Language, FCL) и созданы с учетом нечеткой логики. Они используют новый тип данных – языковые переменные, которые связаны с цифровыми переменными через систему имен данных [21].

Сфера применения Интернета Вещей в добыче полезных ископаемых простирается далеко за пределы продвинутой диагностики и контроля загрузки оборудования вдоль общей производственной цепочки. Как следует из Рис. 3, «Цифровое горное предприятие» основано на таких взаимодействиях на платформе «Интернета Вещей», как динамическое планирование и прогнозирование экономических индикаторов, мониторинг безопасности труда, автоматизированные логистические цепочки [22].



Рис. 3. Интернет Вещей в Майнинге 4.0
Fig. 3. Internet-connected things in Mining 4.0

Цифровые двойники в Майнинге 4.0 представляют собой сложные киберфизические системы, объединяющие «лучшие практики» менеджеров и «лучшие навыки» людей и машин для радикального повышения производительности. Такие системы позволяют преодолеть ограничения неодинаковой производительности и скорости передачи данных различных информационных систем, применяемых инженерами и руководителями горных предприятий – мобильных устройств, персональных компьютеров, контроллеров, установленных на оборудовании. Ключом к созданию цифровых клонов, объединяющих устройства разных типов и вычислительной производительности, являются асинхронные требования к их программному интерфейсу.

Благодаря асинхронным требованиям к единому цифровому двойнику физического процесса, воспроизводимому на разных устройствах, линейные производственные цепочки трансформируются в цифровые логистические сети поставок, а разные подключенные пользователи могут быстро реагировать на любые изменения в режиме реального времени (Рис. 4).

Динамично развивающиеся цифровые производственные платформы Индустрии 4.0 – Материалы 4.0, Майнинг 4.0, Энергия 4.0 – сталкиваются с ограничениями производительности, связанными с отсутствием унифицированных средств обработки больших объемов информации. Эту проблему позволяет решить упрощение цифрового потока как ключевой концепции создания цифрового двойника. Применительно к Майнингу 4.0 применение виртуальной реальности для управления цифровыми двойниками процессов в организации труда позволит уменьшить количество физических прототипов и ускорить процесс принятия управленческих и инженерных решений.



Рис. 4. Применение цифрового двойника в добывающем секторе экономики
Fig. 4. The use of the digital twin in the extractive sector of the economy

Имитационное моделирование управленческих и технологических процессов при помощи цифровых двойников позволяет протестировать их в виртуальной среде и таким образом перейти от автономной системы поддержки принятия решений к сетевой, верифицирующей решения в режиме реального времени. Функции цифровых двойников в сетевом процессе принятия управленческих решений сводятся к подключению всех пользователей к крупной информационной системе (интегрированное управление), уменьшению масштабов физического моделирования и прототипирования, полностью автоматизированному проектированию.

Другой составляющей цифрового ядра Майнинга 4.0 выступают Большие Данные и Облачные Вычисления. В отличие от анализа небольших потоков данных автономными информационными системами большие Данные позволяют генерировать новые знания, которые меняют «цифровой ландшафт» современного минерально-сырьевого комплекса, развивают машинное обучение и искусственный интеллект [23]. Наряду с эксплуатацией горного оборудования опора на Большие Данные дает положительные результаты для геологоразведки. Фактически сегодня формируется т.н. «интеллектуальная геологоразведка» с созданием концептуальных моделей больших пространственных данных. Их использование позволяет радикально повысить точность геологической документации и в конечном итоге улучшить качество полезного ископаемого, сократить затраты на его добычу. Переход к «интеллектуальной геологоразведке» позволяет разрабатывать месторождения, расположенные на недоступной ранее глубине, а также сложно структурированные месторождения, ценность которых значительно возрастает в будущем, по мере исчерпания месторождений полезных ископаемых, начало разработки которых пришлось на 20-й в.

Не менее важная часть конвергенции цифровых технологий Индустрии 4.0 и современных физических контроллеров – т.н. «Умные Сенсоры». Они позволяют осуществлять мониторинг состояния отдельных узлов промышленного оборудования в режиме реального времени, классифицировать и анализировать информацию до уровня готовности к принятию решений. В частности, соединение Умных Секторов с вентиляционным оборудованием в единую систему позволяет визуализировать воздушные потоки с высокой точностью, смоделировать эффективность проветривания в различных условиях, в том числе аварийных, для достижения порогового уровня точности моделирования минимум 30% горных выработок должны быть оснащены умными датчиками в количестве не менее 200 единиц, что впервые было апробировано на предприятии «Корпорации Джунмей Лимитед» (Junmei Corporation Ltd, Шанхай, КНР) [24]. Особый акцент в применении Умных Датчиков в обеспечении безопасности труда делается на портативные носимые датчики газов в горных выработках.

Активные умные сенсоры имеют неоспоримые преимущества, заключающиеся в корректной передаче информации, в комплексном получении данных о состоянии горного массива, окружающей среде и работе оборудования. Особое значение применение активных сенсоров играет в открытых горных работах, для которых перспективным являются лидар-системы (LiDAR), соединенные с GPS и создающие высокоточные пространственные 3D-«облака точек»,

используемые как для прогнозирования перемещений добытого полезного ископаемого, так и для виртуального проектирования горных работ [25].

На подземных горных работах важно своевременно определить нарушения земной поверхности, вызванные обрушением подработанных пространств. Поэтому анализ Больших Данных в виде облаков точек, получаемых с помощью (Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar, D-InSAR), позволяет своевременно отслеживать изменения скорости проседания земной поверхности в зонах подработки и выявлять его параметры, наиболее значимые для прогнозирования в нарушении почвенного покрова [26]. Новые возможности мониторинга деформации поверхности в зоне интенсивных горных работ дает дифференцированная радарная интерферометрия (Differential Radar Interferometry, DSAR), которая позволяет удаленно создавать прогнозные карты деформации земли, что особенно важно для развития застройки участков над полями отработанных шахт. «Облака точек», представляющие собой цифровую модель горных выработок, получаемые при помощи синтетического интерферометрического радара (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR), позволяют спрогнозировать деформации подземных горных выработок в ходе смещения блоков горных пород над ними.

Применение большого числа «Умных Сенсоров» для создания масштабируемой модели участка интенсивных горных работ позволяет использовать построения (Visual Attention Model) по данным дистанционного зондирования с наибольшей возможной точностью. Полученная модель многофункциональна и позволяет перейти к полной безлюдной автоматизации добычи полезного ископаемого и снизить его потери [27].

Использование подземных георадаров как «Умных Сенсоров» для локального позиционирования для контроля горных массивов может быть более точным, если оно сопряжено с цифровыми устройствами глобального спутникового позиционирования (Global Navigation Satellite System, GNSS) и синхронизатором времени посекундных импульсов (Pulse Per Second, PPS). В результате применения таких цифровых технологий достигается непревзойденная точность моделирования, необходимая для безопасного строительства объектов, в том числе нового жилья и инфраструктуры в зоне закрытых и законсервированных шахт.

Новым шагом в развитии Умных Сенсоров являются т.н. мультисенсорные беспилотные летательные аппараты, интегрирующие фотоизображение и данные магнитного поля. В результате внедрения инновационных алгоритмов машинного обучения для обработки данных с таких умных датчиков возможно удаленное геологическое картирование участков земли, покрытых густым лесом.

Наиболее передовой формой конвергентных цифровых технологий Индустрии 4.0 выступает виртуальная и дополненная реальность, потоковая вычислительная гидродинамика (Computational Fluid Dynamics, CFD). В частности, управление грузопотоками внутри карьера можно значительно улучшить за счет совершенствования системы беспроводной связи. Использование геоинформационных систем (Geographic Information Systems, GIS) совместно с позиционированием Умных Сенсоров на основе трехмерных индексов позволит обеспечить максимально детальное 3D-моделирование за счет покрытия карьерного поля беспроводной 5G-связью (Рис. 5) [28].

Важная часть ядра Майнинга 4.0 – 3D-моделирование промышленных процессов – наталкивается на высокую неоднородность данных о состоянии природных и техногенных объектов. Оригинальным решением повысить точность моделирования является 3D-печать образцов горной породы для последующих испытаний. Особую роль 3D-моделирование горных выработок и других объектов играет в проектировании подводных добывающих комплексов с экстремальными условиями давления и сопротивления жидкости. Применение метода потоковой вычислительной гидродинамики позволяет разрабатывать инженерно-технические и организационно-экономические модели управления подводными роботами.

Цифровое моделирование в минерально-сырьевом комплексе является безусловно важным средством снижения предельных издержек добычи полезных ископаемых, что необходимо для планирования увеличения производственной мощности предприятий в ответ на рост спроса на рынке сырья. 3D-виртуализация сложных систем горных предприятий позволяет синхронно прогнозировать изменение горнопромышленных и рыночных экономических условий.

Перспективы основания новых месторождений полезных ископаемых и реконструкция действующих предприятий связаны с качеством управления активами, повысить которое призван

регулярных беспристрастный аудит. Такой аудит является также важной частью процесса обеспечения безопасности добычи полезных ископаемых. Современные цифровые технологии позволяют сделать аудит на горнодобывающих предприятиях беспристрастным и заслуживающим доверия за счет широкого применения технологии блокчейн, Облачных Вычислений и мобильных устройств. Интересантами аудита активов горнодобывающих предприятий чаще всего выступают их собственники, а также производители оборудования, государственные инспекторы. Для формирования аудита горнодобывающих предприятий на платформе блокчейн требуются четыре основных элемента – порождение Индустрии 4.0: комплекс Облачных Вычислений, мобильное приложение, подключенные периферийные устройства, собственно блокчейн (Рис. 6) [29].



Рис. 5. Пример роботизации и безлюдной автоматизации карьера на основе 3D-моделирования и покрытия Умными 5G-Сенсорами. А) центр управления процессами; Б) результат 3D-сканирования

Fig. 5. An example of robotization and unmanned automation of a quarry based on 3D modeling and coverage with Smart 5G Sensors. A) process control center; B) the result of a 3D scan

Наряду с осуществлением аудита активов горнодобывающих предприятий технологии распределенных вычислений и блокчейн являются многообещающими в прогнозировании концентрации газа в угольных шахтах – ключевого фактора безопасности. Новые модели прогнозирования в ходе обработки больших пакетов потоковых данных за минимальное время позволяют

делать сверхточные прогнозы концентрации вредных газов в угольных шахтах в реальном времени благодаря особенностям технологии блокчейн, заключающейся в высоком уровне защищенности и сохранности передаваемой информации, что играет важную роль в обеспечении кибербезопасности современных горных работ.



Рис. 6. Высокоуровневая архитектура интеграции Интернета Вещей и блокчейн в аудите горного предприятия

Fig. 6. High-level architecture of Integrating the IoT and Blockchain Technology in the mine inspection

Применение нейронных сетей глубокого обучения (Deep Learning Neural Link, DLNL) для отслеживания причин отказов горнодобывающего оборудования является наиболее практически ориентированным сегментом платформы Майнинга 4.0, поскольку позволяет применить искусственный интеллект для исключения человеческого фактора из управления и обслуживания машин и механизмов.

Наряду с применением нейросетей для анализа отдельных процессов в системе организации горных работ и производительности оборудования т.н. самообучающиеся нейросети (иначе называемые «нейросети без учителя» – Network without a Teacher) могут быть успешно использованы для анализа проблем и успехов решения экологических проблем в добывающих кластерах. В частности, нельзя не отметить позитивный опыт корректировки Европейской климатической стратегии (European Climate Strategy) в соответствии с новыми документами в сфере «зеленой экономики», фиксирующими изменения выбросов загрязняющих веществ от горнодобывающего комплекса. Эти изменения были просчитаны при помощи самоорганизующейся карты Кохонена (Kohonen's Network) [30].

Использование нейросети как перспективного направления развития платформы Майнинга 4.0 в целях радикального повышения безопасности труда в шахтах позволяет значительно улучшить прогнозирование бесперебойности ведения горных работ, движения людских, материальных и финансовых потоков. Успешным примером этого можно считать китайский опыт применения ряда нейросетей – рекуррентной (Recurrent Neural Network, RNN), длинной краткосрочной памяти (Long Short-Term Memory, LSTM), шлюзового рекуррентного блока (Gated Recurrent Unit, GRU). Важность их применения связана с тем, что появление опасных факторов всегда нелинейно по времени и пространству и меняется по мере продвижения горных работ. При помощи алгоритмов машинного обучения возможно одновременно обрабатывать большое количество ретроспективных и текущих данных о действии опасных факторов, что позволяет спрогнозировать их усиление с точностью до 97% [31].

Другим применением нейросетей в проектировании и управлении развитием горнодобывающих кластеров является прогнозирование сейсмических явлений и раннее распознавание движения блоков горных пород в литосфере. В частности, позитивно зарекомендовала себя модель искусственного интеллекта для предсказания сейсмических явлений на основе двух нейросетей – векторной машины поддержки (Support Vector Machine – SVM) и волновой распространяемой декомпозиции (Wavelet Scattering Decomposition – WSD). Созданная модель интеллектуального распознавания микросейсмических событий обеспечивает метод быстрого анализа опасных процессов с высокой степенью точности прогнозирования [32].

Многочисленные эксперименты показали, что применение нейросетей для оптимизации параметров буровзрывных работ позволяет обеспечить эффективность разрушения и перемещения горных пород взрывом таким образом, что эксплуатационные расходы будут значительно снижены, а безопасность труда и окружающей среды возрастет.

Методы машинного зрения и обучения как неотъемлемая часть Майнинга 4.0 все больше способствуют комплексному охвату процессов, происходящих непосредственно в процессе ведения горных работ. Т.н. эффект «спилловер», получаемый в ходе диффузии технологий Майнинга 4.0 в смежные отрасли, позволяет применить машинное зрение и обучение в анализе интенсивности повреждений зданий в ходе многолетнего воздействия агрессивной среды угледобывающих предприятий. Такое машинное обучение возможно при помощи таких методов, как вероятностная нейросеть (Probabilistic Neural Network), наивная Байесова классификация и Байесова доверительная сеть (Naive Bayes Classification and Bayesian Belief Networks) [33].

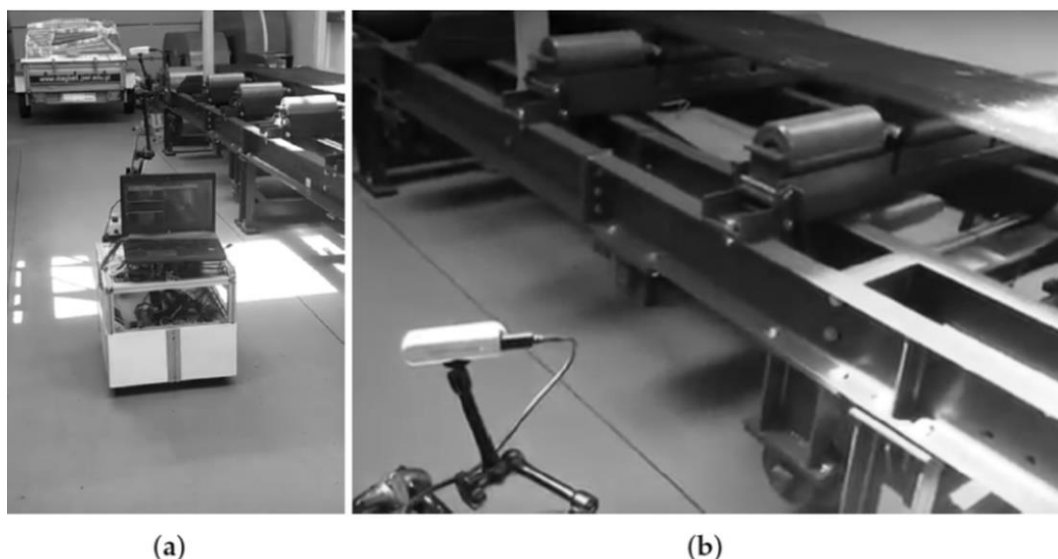


Рис. 7. Инспекционный робот во время эксперимента: а) общее фото; (b) фото с сенсора
Fig. 7. An inspection robot during the experiment: (a) general photo; (b) zoom on sensor

Регулярный контроль работы оборудования необходим для бесперебойной организации труда на всем предприятии в целом. Инновационные технологии Майнинга 4.0 позволяют сократить присутствие в шахтах в сложных и опасных условиях значительного количества людей – операторов оборудования и механиков. Потенциальным решением данной проблемы, сопряженной с повышением надежности приводов и лент конвейеров, является создание мобильных роботов-инспекторов, собирающих разнородную информацию (инфракрасное изображение, звук и ультразвук, датчики газа и т.п.). Исследования показали, что система роботизированного контроля над состоянием шахтного конвейера способна автономно выполнить всю процедуру проверки (Рис. 7) [34].

Применение дронов в минерально-сырьевом комплексе сегодня отличается достаточным многообразием: 3D-картографирование окружающей среды шахты, контроль качества буровзрывных работ и состояния угольных складов, мониторинг устойчивости хвостохранилищ. В соответствии с этим среди видов конструкции дронов и их оборудования также наблюдается значительное разнообразие. Самым современным направлением развития практики применения

дронов в горном деле является использование их в шахтах, с постепенным преодолением специфических проблем, таких как отсутствие GPS и неоднородность беспроводного сигнала, ограниченное пространство, концентрация пыли и газов (Табл. 3).

Таблица 3. Применение дронов на горнодобывающих предприятиях

Table 3. The use of drones in mining enterprises

Применение	Описание
Участки открытых горных работ	
Прогнозирование оползней и обрушений, картирование нарушений	Создание карты нарушений поверхности, геодезическая фотограмметрия
Расчет объемов экскавационных и буровзрывных блоков, емкостей под внутренние отвалы	Создание качественной цифровой 3D-модели рельефа для расчета объемов горной массы для рекультивации карьера
Высаживание образования инвазионных растений	Картирование мест, где существуют инвазивные растения
Рекультивация	Создание 3D-модели рекультивируемых карьерных полей и отвалов
Участки подземных горных работ	
Картирование шахтных целиков	Сбор данных, связь и картографирование целиков в заброшенных подземных шахтах, прогнозирование горных ударов
Опережающее выявление метана	Создание трехмерной виртуальной карты шахты из трехмерной информации об облаке точек от оптических датчиков для прогнозирования объемов метана
Мониторинг химического состава шахтных вод	Прогнозирование поступления вредных веществ из заброшенных шахт и хвостохранилищ в водоток
Мониторинг систем вентиляции	Объединение данных GPS с цифровыми фотографиями с дронов для создания карт с ортотрансформацией



Рис. 8. Принципиальная схема технологии интеллектуального видеонаблюдения

Fig. 8. Schematic diagram of intelligent video surveillance technology

Переход к безлюдным процессам как к основам управления будущими горнодобывающими предприятиями логично начинать с роботизацией групповых работ в замкнутых пространствах с высоким риском для людей. Технологическое ядро Майнинга 4.0 – Интернет Вещей, 5G, искусственный интеллект, нейронные сети – проникая в добычу угля, постепенно формирует режим интеллектуальной адаптивной добычи, основанной на интегрированной автоматизации обо-

рудования и удаленной визуализации. В таком адаптивном режиме безлюдного производства машинное зрение, используя данные из многих источников, формирует физические модели производства для интеллектуального анализа данных и автоматического управления оборудованием (такие как самообучаемые и адаптивные управляющие системы рабочих органов оборудования). В свою очередь операторы безлюдного горнодобывающего оборудования анализируют данные, полученные машинным зрением, и контролируют полностью механизированное горное оборудование, минимизируя дистанционное вмешательство (Рис. 8) [35].

Таким образом, в ходе диффузии сквозных технологий Майнинга 4.0 переход к сверхточному анализу, планированию и прогнозированию организации горных работ, управлению безлюдными процессами с роботизированным оборудованием не означает полное исключение человека из непосредственного контроля над ними. Переход к роботизированному горному оборудованию означает зонирование процессов и участков горнодобывающих предприятий, в которых происходит эксплуатация оборудования с элементами машинного зрения и искусственного интеллекта. В частности, необходимо выделить три типа зон с разным уровнем баланса между человеческим и машинным контролем: производственные зоны с «нулевым входом», зоны присутствия человека для обслуживания машин и механизмов, зоны постоянного присутствия человека (Рис. 9).



Рис. 9. Зонирование участков горных предприятий по уровню распространения безлюдных технологий

Fig. 9. Zoning of sites of mining enterprises according to the level of spread of unmanned technologies

Обзор тренда цифровизации минерально-ресурсного сектора современной экономики позволил заключить, что по сравнению с современной нам платформой Майнинг 3.0, сформировавшейся в 1970-1990-х гг. в ходе третьей промышленной революции, в Майнинге 4.0 вместо углубления автоматизации производства на первое место выходят новые формы соединения человека, машин и технологий. Общим трендом развития Майнинга 4.0 является переход к интегрированному компьютеризированному производству, для которого характерна высокая цифровая зрелость извлечения и первичной переработки минерального сырья благодаря быстрому развитию цифровых производственных экосистем. Цифровая трансформация добывающих отраслей реального сектора экономики порождает его доменную организацию, в которой различные процессы получают свое цифровое отражение и управление, а производительность труда возрастает радикально.

4 Conclusion / Заключение

Переход горнодобывающей промышленности на платформу Майнинг 4.0 – результат отраслевой диффузии сквозных технологий Четвертой промышленной революции – несет в себе новые возможности повышения производительности, рентабельности и инвестиционной привлекательности добывающих предприятий в условиях флуктуаций мирового рынка сырья и структурных сдвигов.

Основные технологические инновации, определяющие цифровизацию минерально-сырьевого сектора на платформе Майнинга 4.0, включают в себя Интернет Вещей, цифровые двойники, Большие Данные, распределенные и облачные вычисления, Умные Сенсоры, 3D-визуализацию и моделирование, виртуальную и дополненную реальность, вычислительную гидродинамику, блокчейн, искусственный интеллект и нейронные сети. Такое разнообразие областей диффузии цифровых технологий в горнодобывающей промышленности свидетельствует о постепенной замене физических систем киберфизическими (благодаря искусственному интеллекту и нейросетям), о скорой возможности визуализировать движение грузопотоков для их беспрецедентной оптимизации, получить полный контроль над надежной и безопасной работой оборудования.

Обзор сегмента платформы Майнинга 4.0, представленного дронами и промышленными роботами, позволяет говорить о безлюдных процессах и целых предприятиях по извлечению минерального сырья как о наиболее вероятном будущем. Для беспрецедентного роста производительности предприятий, занятых в добыче и переработке сырья, необходимо новое поколение коллаборативных роботов, которые объединят в себе технологии машинного зрения и обучения, позволят в значительной степени исключить человеческий фактор в техногенных авариях и радикально повысить устойчивость всей отрасли в условиях кризисов рынков сырья.

Таким образом, рассмотренный опыт разработки внедрения технологий Майнинга 4.0 показал значимый прирост производительности, безопасности труда и окружающей среды, существенный рост рентабельности добычи полезных ископаемых. Вместе с тем сохраняются производственно-технические, социальные, экологические риски, связанные с невозможностью полной замены цифровыми технологиями человека в системе управления процессами горных работ и горнодобывающими предприятиями в целом. Снижение данных рисков видится возможным в процессе поиска новых форм соединения человека и искусственного интеллекта, например, в рамках прямой эмуляции управления при проектировании дистанционного управления оборудованием и горными работами. Важно анализировать инновационное развитие отрасли с точки зрения интересов работников, с тем чтобы своевременно обеспечить омологацию инженерного корпуса добывающих предприятий в условиях диффузии технологий Индустрии 4.0 в производство.

Список источников

1. Ковалев С.Г. Миропорядок большой Евразии и технологическая суверенность России // Большая Евразия: развитие, безопасность, сотрудничество. – 2021. – № 4-1. – С. 96-101.
2. Мамедов В.Р. Влияние технологического прогресса на трансформацию сущности государственного суверенитета // Инновации и инвестиции. – 2021. – № 8. – С. 21-25.
3. Песков Д. Почему для России важен технологический суверенитет // РБК-Газета. – 2022. – № 077 (3570). – С. 1006.
4. Маслов В.И., Лукьянов И.В. Четвертая промышленная революция: истоки и последствия // Вестник Московского университета. Серия 27. Глобалистика и геополитика. – 2017. – № 2. – С. 38-48
5. Price Waterhouse and Coopers. Горнодобывающая промышленность, 2021 год. URL: <https://www.pwc.ru/publications/mine-2021/mine-2021.pdf> (последнее обращение: 05.09.2022).
6. Сольева К.Ю., Мировые тренды развития энергетической отрасли в условиях технологических изменений "Индустрии 4.0" // Инновационная наука. – 2019. – №5. – С. 108-113.
7. Димитров И.Д. Влияние цифровой экономики на развитие транспортной отрасли в России // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2017. – №6 (73). – С. 50-53.
8. Александрова Т.В. Формирование концептуальной модели цифровой трансформации производственных бизнес-процессов на нефтегазовых предприятиях // Вестник Томского государственного университета. Экономика. – 2019. – №48. – С. 234-252.
9. Матрица национальной технологической инициативы (НТИ). URL: https://nti2035.ru/matrix/img/matrix_nti_2021.pdf (последнее обращение: 05.09.2022).
10. Kumar R., Prasad A., Kumar A. Sustainable Smart Manufacturing Processes in Industry 4.0. – New York: CRC Press, 2022. – 328 p.
11. Singh R., Akram S.V., Gehlot A., Buddhi D., Priyadarshi N., Twala B. Energy System 4.0: Digitalization of the Energy Sector with Inclination towards Sustainability // Sensors. – 2022. – Vol. 22(17). – pp. 6619.
12. Bongaerts J.C. Mining 4.0 in developing countries. In Book: Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues / Ed. by V. Litvinenko. – London: CRC Press, 2019. – pp. 171-181.
13. Frenz W. Industry 4.0 in Mining. In the Book: Yearbook of Sustainable Smart Mining and Energy / Ed. by W. Frenz, A. Preusse. – New York: Springer, 2022. – pp. 13-22.

14. Clausen E., Sorensen A., Nienhaus K. Mining 4.0. In book: Handbook Industry 4.0. Law, Technology, Society / Ed. by W. Frenz, A. Preusse. – New York: Springer, 2022. – pp. 785-792.
15. Palka D., Rizaoglu T. The concept of hard coal mine in the perspective of Industry 4.0 // Multidisciplinary Aspects of Production Engineering. – 2019. – Vol. 2(1). – pp. 327-335.
16. Simeunovic V., Dimitrijevic S., Stosic D., Pantelic S.D. Industry 4.0 in the Context of Coal Mining. International Conference on Applied Internet and Information Technologies // AIIIT2020. – 2016. – pp. 1-7.
17. Ivanov S.V., Chekina V.D. Development of Mining in the Conditions of Industry 4.0: New Challenges and Opportunities // Economy of Industry. – 2020. – Vol. 1 (89). – pp. 102-111.
18. Clausen E., Sorensen A., Uth F., Mitra R. Assessment of the Effects of Global Digitalization Trends on Sustainability in Mining. – Hannover: Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, 2020. – 69 p.
19. Kalkman J., Epikhin I., Rajeswaran A., Rogers S. Agile crocodile: The modern metals & mining sector and its future. – Luxembourg: Arthur D. Little, 2019. – 20 p.
20. Aziz A., Schelen O., Bodin U. A Study on Industrial IoT for the Mining Industry: Synthesized Architecture and Open Research Directions // Internet of Things. – 2020. – Vol. 1(2). – pp. 529-550.
21. Krylko M.Yu., Olivetskiy I.N. Digital transformations in drive control technology for exploration and mining equipment // Geology and Exploration. – 2020. – Vol. 63(6). – pp. 35-45.
22. The Challenge of Industry 4.0 and the Demand for New Answers. – Geneva: IndustriALL Head Office, 2020. – 36 p.
23. Tyleckova E., Noskiewicz D. The role of big data in Industry 4.0 in mining industry in Serbia // CzOTO. – 2020. – Vol. 2(1). – pp. 166-173.
24. Liu Y., Liu Z., Gao K., Huang, Y.; Zhu, C. Efficient Graphical Algorithm of Sensor Distribution and Air Volume Reconstruction for a Smart Mine Ventilation Network // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – pp. 2096.
25. Wajs J., Trybala P., Gorniak-Zimroz J., Krupa-Kurzynowska J., Kasza D. Modern Solution for Fast and Accurate Inventorization of Open-Pit Mines by the Active Remote Sensing Technique – Case Study of Mikoszew Granite Mine (Lower Silesia; SW Poland) // Energies. – 2021. – Vol. 14(20). – pp. 6853.
26. Fan H., Gao X., Yang J., Deng K., Yu Y. Monitoring Mining Subsidence Using A Combination of Phase-Stacking and Off-set-Tracking Methods // Remote Sensing. – 2015. – Vol. 7(7). – pp. 9166-9183.
27. Peng Y., Zhang Z., He G., We M. An Improved GrabCut Method Based on a Visual Attention Model for Rare-Earth Ore Mining Area Recognition with High-Resolution Remote Sensing Images // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11(8). – pp. 987.
28. Baek J., Choi Y. A New GIS-Based Algorithm to Support Initial Transmitter Layout Design in Open-Pit Mines // Energies. – 2018. – Vol. 11(11). – pp. 3063.
29. Pincheira M., Antonini M., Vecchio M. Integrating the IoT and Blockchain Technology for the Next Generation of Mining Inspection Systems // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – pp. 899.
30. Brodny J., Tutak M. The Use of Artificial Neural Networks to Analyze Greenhouse Gas and Air Pollutant Emissions from the Mining and Quarrying Sector in the European Union // Energies. – 2020. – Vol. 13(8). – pp. 1925.
31. Meng X., Chang H., Wang X. Methane Concentration Prediction Method Based on Deep Learning and Classical Time Series Analysis // Energies. – 2022. – Vol. 15. – pp. 2262.
32. Fan X., Cheng J., Wang Y., Li S., Yan B., Zhang Q. Automatic Events Recognition in Low SNR Microseismic Signals of Coal Mine Based on Wavelet Scattering Transform and SVM // Energies. – 2022. – Vol. 15. – pp. 2326.
33. Chomacki L., Rusek J., Slowik L. Machine Learning Methods in Damage Prediction of Masonry Development Exposed to the Industrial Environment of Mines // Energies. – 2022. – Vol. 15. – pp. 3958.
34. Szrek J., Jakubiak J., Zimroz R. A Mobile Robot-Based System for Automatic Inspection of Belt Conveyors in Mining Industry // Energies. – 2022. – Vol. 15. – pp. 327.
35. Zhang K., Kang L., Chen X., He M., Zhu C., Li D. A Review of Intelligent Unmanned Mining Current Situation and Development Trend // Energies. – 2022. – Vol. 15. – pp. 513.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2022 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы

Жиронкина Ольга Валерьевна – кандидат педагогических наук, доцент, Кемеровский государственный университет 650000, г. Кемерово, ул. Красная, 6, e-mail: o-zhironkina@mail.ru

References

1. Kovalev S.G. Miroporjadok bol'shoj Evrazii i tehnologicheskaja suverennost' Rossii [The World Order of Greater Eurasia and the Technological Sovereignty of Russia]. Bol'shaja Evrazija: razvitie, bezopasnost', sotrudnichestvo = Greater Eurasia: Development, Security, Cooperation. 2021. Vol. 4-1. pp. 96-101.
2. Mamedov V.R. Vlijanie tehnologicheskogo progressa na transformaciju sushhnosti gosudarstvennogo suvereniteta [The impact of technological progress on the transformation of the essence of state sovereignty]. Innovacii i investicii = Innovations and investments. 2021. Vol. 8. ppS. 21-25.
3. Peskov D. Pochemu dlja Rossii vazhen tehnologicheskij suverenitet [Why technological sovereignty is important for Russia]. RBC-Gazeta. 2022. Vol. 077 (3570). pp. 1006.
4. Maslov V.I., Luk'janov I.V. Chetvertaja promyshlennaja revoljucija: istoki i posledstvija [The fourth industrial revolution: origins and consequences]. Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 27. Globalistika i geopolitika = Bulletin of the Moscow University. Series 27. Global studies and geopolitics 2017. Vol. 2. pp. 38-48
5. Price Waterhouse and Coopers. Gornodobyvajushhaja promyshlennost', 2021 god [Mining industry, 2021]. URL: <https://www.pwc.ru/publications/mine-2021/mine-2021.pdf> (last access: 05.09.2022).
6. Sol'eva K.Ju., Mirovye trendy razvitiya jenergeticheskoy otrasli v uslovijah tehnologicheskikh izmenenij "Industrii 4.0" [Global trends in the development of the energy industry in the context of technological changes "Industry 4.0"]. Innovacionnaja nauka = Innovative science. 2019. Vol. №5. pp. 108-113.
7. Dimitrov I.D. Vlijanie cifrovoj jekonomiki na razvitie transportnoj otrasli v Rossii [Influence of the digital economy on the development of the transport industry in Russia]. Transport Rossijskoj Federacii. Zhurnal o nauke, praktike, jekonomike = Transport of the Russian Federation. Journal of science, practice, economics. 2017. Vol. 6 (73). pp. 50-53.
8. Aleksandrova T.V. Formirovanie konceptual'noj modeli cifrovoj transformacii proizvodstvennyh biznes-processov na neftegazovyh predpriyatiyah [Formation of a conceptual model of digital transformation of production business processes at oil and gas enterprises]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Jekonomika = Bulletin of the Tomsk State University. Economy. 2019. Formation of a conceptual model of digital transformation of production business processes at oil and gas enterprises. Bulletin of the Tomsk State University. Economy. Vol. 48. pp. 234-252.
9. Matrica nacional'noj tehnologicheskoy iniciativy (NTI) [Matrix of the National Technology Initiative (NTI)]. URL: https://nti2035.ru/matrix/img/matrix_nti_2021.pdf (last access: 05.09.2022).
10. Kumar R., Prasad A., Kumar A. Sustainable Smart Manufacturing Processes in Industry 4.0. New York: CRC Press, 2022. 328 p.
11. Singh R., Akram S.V., Gehlot A., Buddhi D., Priyadarshi N., Twala B. Energy System 4.0: Digitalization of the Energy Sector with Inclination towards Sustainability. Sensors. 2022. Vol. 22(17). pp. 6619.
12. Bongaerts J.C. Mining 4.0 in developing countries. In Book: Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues / Ed. by V. Litvinenko. London: CRC Press, 2019. pp. 171-181.
13. Frenz W. Industry 4.0 in Mining. In the Book: Yearbook of Sustainable Smart Mining and Energy / Ed. by W. Frenz, A. Preusse. New York: Springer, 2022. pp. 13-22.
14. Clausen E., Sorensen A., Nienhaus K. Mining 4.0. In book: Handbook Industry 4.0. Law, Technology, Society / Ed. by W. Frenz, A. Preusse. New York: Springer, 2022. pp. 785-792.
15. Palka D., Rizaoglu T. The concept of hard coal mine in the perspective of Industry 4.0. Multidisciplinary Aspects of Production Engineering. 2019. Vol. 2(1). pp. 327-335.
16. Simeunovic V., Dimitrijevic S., Stosic D., Pantelic S.D. Industry 4.0 in the Context of Coal Mining. International Conference on Applied Internet and Information Technologies. AIIT2020. 2016. pp. 1-7.
17. Ivanov S.V., Chekina V.D. Development of Mining in the Conditions of Industry 4.0: New Challenges and Opportunities. Economy of Industry. 2020. Vol. 1 (89). pp. 102-111.
18. Clausen E., Sorensen A., Uth F., Mitra R. Assessment of the Effects of Global Digitalization Trends on Sustainability in Mining. Hannover: Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, 2020. – 69 p.
19. Kalkman J., Epikhin I., Rajeswaran A., Rogers S. Agile crocodile: The modern metals & mining sector and its future. Luxembourg: Arthur D. Little, 2019. – 20 p.
20. Aziz A., Schelen O., Bodin U. A Study on Industrial IoT for the Mining Industry: Synthesized Architecture and Open Research Directions. Internet of Things. 2020. Vol. 1(2). pp. 529-550.
21. Krylkov M.Yu., Olivetskiy I.N. Digital transformations in drive control technology for exploration and mining equipment. Geology and Exploration. 2020. Vol. 63(6). pp. 35-45.
22. The Challenge of Industry 4.0 and the Demand for New Answers. Geneva: IndustriALL Head Office, 2020. 36 p.

23. Tyleckova E., Noskievicova D. The role of big data in Industry 4.0 in mining industry in Serbia. *CzOTO*. 2020. Vol. 2(1). pp. 166-173.
24. Liu Y., Liu Z., Gao K.; Huang, Y.; Zhu, C. Efficient Graphical Algorithm of Sensor Distribution and Air Volume Reconstruction for a Smart Mine Ventilation Network. *Sensors*. 2022. Vol. 22. pp. 2096.
25. Wajs J., Trybala P., Gorniak-Zimroz J., Krupa-Kurzynowska J., Kasza D. Modern Solution for Fast and Accurate Inventorization of Open-Pit Mines by the Active Remote Sensing Technique – Case Study of Mikoszków Granite Mine (Lower Silesia; SW Poland). *Energies*. 2021. Vol. 14(20). pp. 6853.
26. Fan H., Gao X., Yang J., Deng K., Yu Y. Monitoring Mining Subsidence Using A Combination of Phase-Stacking and Off-set-Tracking Methods. *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7(7). pp. 9166-9183.
27. Peng Y., Zhang Z., He G., We M. An Improved GrabCut Method Based on a Visual Attention Model for Rare-Earth Ore Mining Area Recognition with High-Resolution Remote Sensing Images. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11(8). pp. 987.
28. Baek J., Choi Y. A New GIS-Based Algorithm to Support Initial Transmitter Layout De-sign in Open-Pit Mines. *Energies*. 2018. Vol. 11(11). pp. 3063.
29. Pincheira M., Antonini M., Vecchio M. Integrating the IoT and Blockchain Technology for the Next Generation of Mining Inspection Systems. *Sensors*. 2022. Vol. 22. pp. 899.
30. Brodny J., Tutak M. The Use of Artificial Neural Networks to Analyze Greenhouse Gas and Air Pollutant Emissions from the Mining and Quarrying Sector in the European Union. *Energies*. 2020. Vol. 13(8). pp. 1925.
31. Meng X., Chang H., Wang X. Methane Concentration Prediction Method Based on Deep Learning and Classical Time Series Analysis. *Energies*. 2022. Vol. 15. pp. 2262.
32. Fan X., Cheng J., Wang Y., Li S., Yan B., Zhang Q. Automatic Events Recognition in Low SNR Microseismic Signals of Coal Mine Based on Wavelet Scattering Transform and SVM. *Energies*. 2022. Vol. 15. pp. 2326.
33. Chomacki L., Rusek J., Slowik L. Machine Learning Methods in Damage Prediction of Masonry Development Exposed to the Industrial Environment of Mines. *Energies*. 2022. Vol. 15. pp. 3958.
34. Szrek J., Jakubiak J., Zimroz R. A Mobile Robot-Based System for Automatic Inspection of Belt Conveyors in Mining Industry. *Energies*. 2022. Vol. 15. pp. 327.
35. Zhang K., Kang L., Chen X., He M., Zhu C., Li D. A Review of Intelligent Unmanned Mining Current Situation and Development Trend. *Energies*. 2022. Vol. 15. pp. 513.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2022 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Authors

Olga V. Zhironkina – C. Sc. in Pedagogy, Assistant Professor, Kemerovo State University, 650000, Kemerovo, Krasnaya st., 6, e-mail: o-zhironkina@mail.ru

