

Научная статья

УДК 622.235

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-6-120-132

МАЙНИНГ 5.0 КАК ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПЛАТФОРМА УГЛЕДОБЫЧИ В ЧЕТВЕРТОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ПЕРЕХОДЕ

Жиронкин Сергей Александрович¹, Коновалова Мария Евгеньевна²,
Жиронкина Ольга Валерьевна³, Селюков Алексей Владимирович¹,
Буялич Геннадий Данилович¹

¹ Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

² Самарский государственный экономический университет

³ Кемеровский государственный университет

* для корреспонденции: zhironkinsa@kuzstu.ru

**Информация о статье**

Поступила:

02 октября 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

22 ноября 2024 г.

Принята к публикации:

02 декабря 2024 г.

Опубликована:

05 декабря 2024 г.

Ключевые слова:

Майнинг 5.0, геотехнология,
Индустрия 5.0, добыча угля,
Четвертый энергетический
переход

Аннотация.

В статье проанализирована роль Майнинга 5.0 – технологической платформы грядущей Пятой промышленной революции в отраслях добычи твердых полезных ископаемых – в осуществлении «бесшовного» Четвертого энергетического перехода, в конце которого ожидается доминирование возобновляемых источников энергии во исполнение Целей устойчивого развития ООН, связанных с сокращением негативного влияния на климат и обеспечением доступа к дешевой энергии. Рассмотрены характерные для Майнинга 5.0 человекоцентричные цифровые технологии (промышленный Интернет Всего, цифровые двойники и тройники физических процессов, генеративный искусственный интеллект, коллаборативные роботы и пр.), которые, соединяясь с традиционной геотехнологией (открытой, подземной), позволяют радикально повысить производительность труда и снизить издержки добычи, а также сократить негативное воздействие на окружающую среду, прежде всего выбросы парниковых газов. Обоснована потребность в технологической трансформации добычи угля до уровня Майнинг 5.0 с целью недопущения шоков энергообеспечения, прежде всего развивающихся стран, находящихся на этапе ускоренной индустриализации с ростом потребления энергоносителей. Авторы связывают повышение роли угля в переходе к возобновляемой энергетике с ростом его доступности в глобальном масштабе, во многом благодаря совершенствованию технологий его добычи на новой цифровой основе, вплоть до перехода от безлюдных машин и механизмов к умной роботизации добывающих предприятий и производственных цепочек извлечения, обогащения и первичной переработки ископаемых энергоносителей.

Для цитирования: Жиронкин С.А., Коновалова М.Е., Жиронкина О.В., Селюков А.В., Буялич Г.Д. Майнинг 5.0 Как технологическая платформа угледобычи в четвертом энергетическом переходе // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 6 (166). С. 120-132. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-6-120-132, EDN: ZZXXWW

Отказ от добычи ископаемых энергоносителей, прежде всего угля и природного газа, и ускоренный переход к нулевым эмиссиям углекислого газа (CO₂) привел бы к откату человечества на 40

тысячелетий назад и гибели его значительной части. Как минимум сохранение высокой доли ископаемых энергоносителей в энергетическом балансе стран подтверждается ростом использования угля в Германии, природного газа

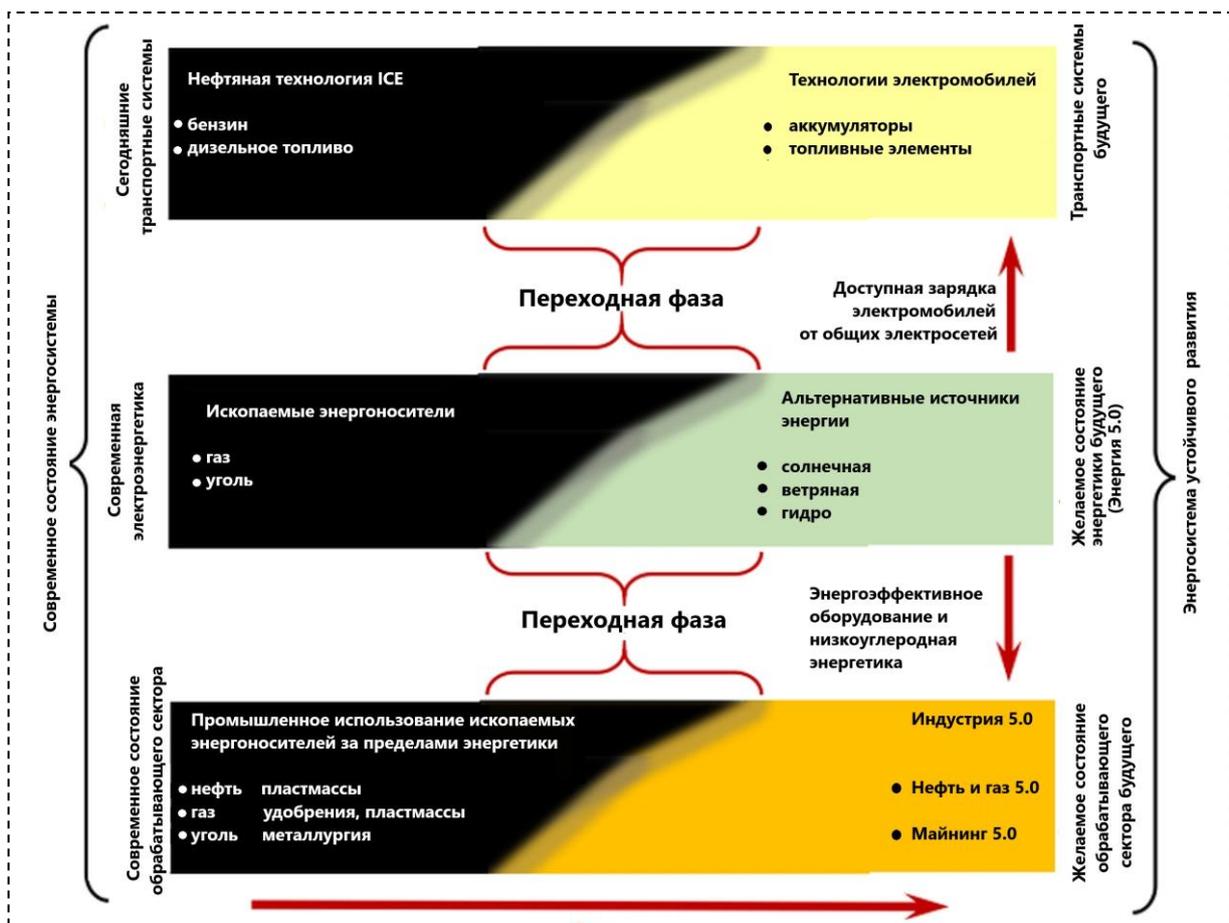


Рис. 1. Цифровая модернизация добычи угля до уровня Майнинга 5.0 в Четвертом энергетическом переходе (адаптировано авторами из: [8])

Fig. 1. Digital modernization of coal mining to the level of Mining 5.0 in the Fourth Energy Transition (adapted by authors from: [8])

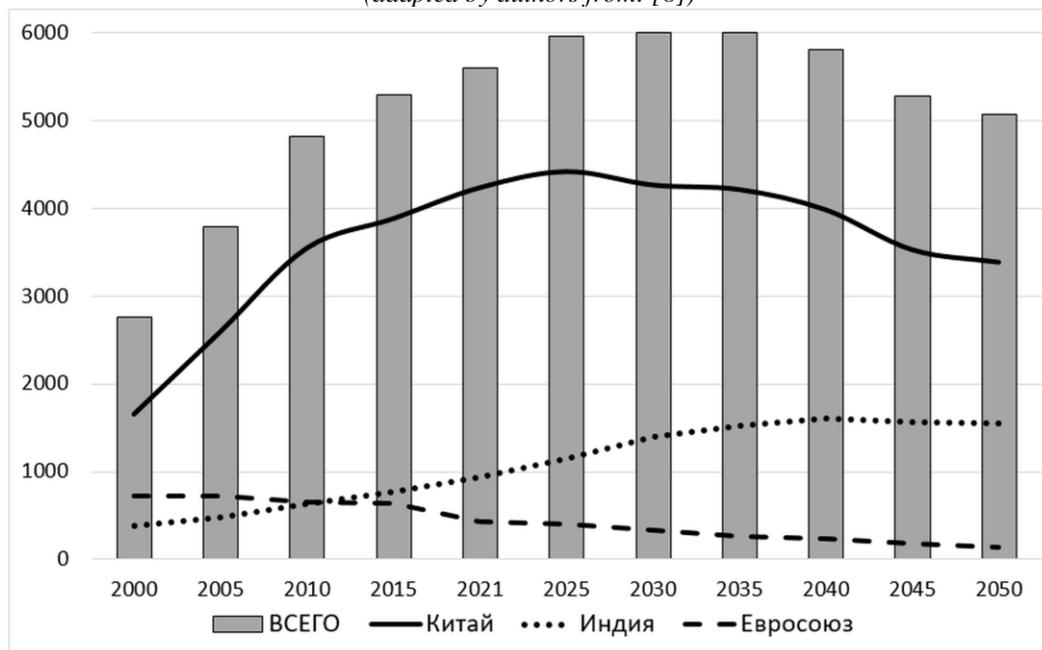


Рис. 2. Статистика и прогнозы спроса на уголь в странах – основных потребителях, млн т (построено авторами по данным [10])

Fig. 2. Statistics and forecasts of coal demand in the main consumer countries, million tons (constructed by the authors based on data from [10])

в Швеции, Франции и США [1]. Вместе с тем от грядущей Пятой Промышленной Революции (Индустрии 5.0) ожидается человекоцентричность не только в создании материальных благ, но и в обеспечении населения и промышленности развитых и развивающихся стран дешевой энергией, достаточной для удовлетворения расширенных потребностей «цифрового общества», без шоков производства и потребления энергии [2]. Поэтому важен Четвертый энергетический переход, суть которого заключается в отказе от сжигания ископаемых энергоносителей в пользу возобновляемых источников энергии (главным образом, солнечной и ветряной, а также приливной) [3]. Однако более вероятным сценарием развития энергетики в будущем видится «энергетический микс» ископаемых и возобновляемых источников, в котором достижимо радикальное сокращение выбросов парниковых газов, благодаря которому Четвертый энергетический переход будет походить «бесшовно», с недопущением шоков и провалов в производстве энергии.

В России наблюдается понимание угроз развитию угольной отрасли как важной для обеспечения долгосрочного экономического развития, в т. ч. на уровне Программы развития угольной промышленности на период до 2035 г. (утверждена Распоряжением Правительства РФ от 13 июня 2020 г. № 1582-р). Эти угрозы связаны в том числе с возвратом мировой и российской экономики к ESG-повестке после пандемии и политической турбулентности [4]. В частности, Программа развития угольной промышленности определила такие риски развития отрасли на десятилетие, как усиление международной конкуренции на рынке угля, давление на спрос, связанный с переходом отдельных стран на низкоуглеродные стратегии развития, экспансия водородной энергетики. Все это предполагает риски нарастания экологических ограничений для российских компаний, добывающих и экспортирующих уголь, как минимум до середины 21 в. В свою очередь, преодоление этих ограничений связывается разработчиками Программы развития угольной отрасли на период до 2035 г. (прежде всего Минэнерго России) с «... ускорением цифровизации производственно-технологических процессов; ... обновлением производственных мощностей по добыче угля на основе инновационных технологий; ... автоматизацией и роботизацией производственных процессов добычи, переработкой и транспортировкой угля с элементами «Индустрия 4.0» на базе технологических платформ и цифровых технологий».

Глобальные перспективы вовлечения угля в «бесшовный» Четвертый энергетический переход связаны с его мировыми запасами, оцениваемыми в 891 млрд т (нефть – 1688 млрд баррелей, газ – 79 трлн куб м). При этом прирост разведанных запасов угля увеличивается со скоростью 19,2 гигатонн нефтяного эквивалента в год. Темпы ежегодного мирового прироста потребления угля составляют 3,1 млн т нефтяного эквивалента при глобальном спросе на энергию в 12 млрд т нефтяного эквивалента. При этом выбросы CO₂ от мировой энергетики составляют 39,5 гигатонн, а в перспективе 2050 г. рост спроса на энергию в 25%-50% может привести к увеличению эмиссий CO₂ до 75 гигатонн. Поэтому наиболее вероятным путем развития производства энергии до конца 21 в. видится «энергетический микс» нового типа, состоящий из ископаемого топлива, водорода, биотоплива и возобновляемых источников энергии [5].

Для полного отказа от угля и природного газа в рамках «бесшовного» Четвертого энергетического перехода требуется дополнительная возобновляемая мощность в 37670,6 ТВт·ч. Это означает, что для поддержания предложения энергии на мировом рынке на уровне 2018 г. в течение одного месяца необходимо построить 22160 новых ветро-, фото- и гидроэлектростанций и запустить гигантские аккумуляторные батареи емкостью 574,3 ТВт·ч. Все это, в свою очередь, не соответствует ни реальным, ни перспективным возможностям мировой промышленности до конца 21 в. [6] В целом в 1980-2021 гг. произошло лишь частичное замещение ископаемого топлива, при этом развивающиеся страны Юго-Восточной Азии, Африки и Южной Америки замещают уголь гораздо меньшими темпами, чем развитые [7].

Майнинг 5.0 в системе Четвертого энергетического перехода

Для добычи угля, равно как природного газа и нефти, во второй половине 21 в. является безальтернативным использование платформы Майнинга 5.0 и Нефтегаза 5.0 для сохранения паритета с возобновляемыми энергоносителями (Рис. 1).

Для отказа от ископаемого топлива к 2050 г. производство возобновляемой энергии необходимо будет увеличить по разным оценкам, от 6 или 8 раз, если спрос на энергию останется на уровне 2020 г., однако наиболее вероятным является его рост на 500-100%. Следовательно, рост производства энергии из возобновляемых источников в 15-18 раз невозможен хотя бы потому, что переход к человекоцентричной цифровой Индустрии 5.0 способен ежегодно увеличивать энергопотребление на 1,5% в 2030-2070 гг. [9]. Это, в свою очередь, в долгосрочном

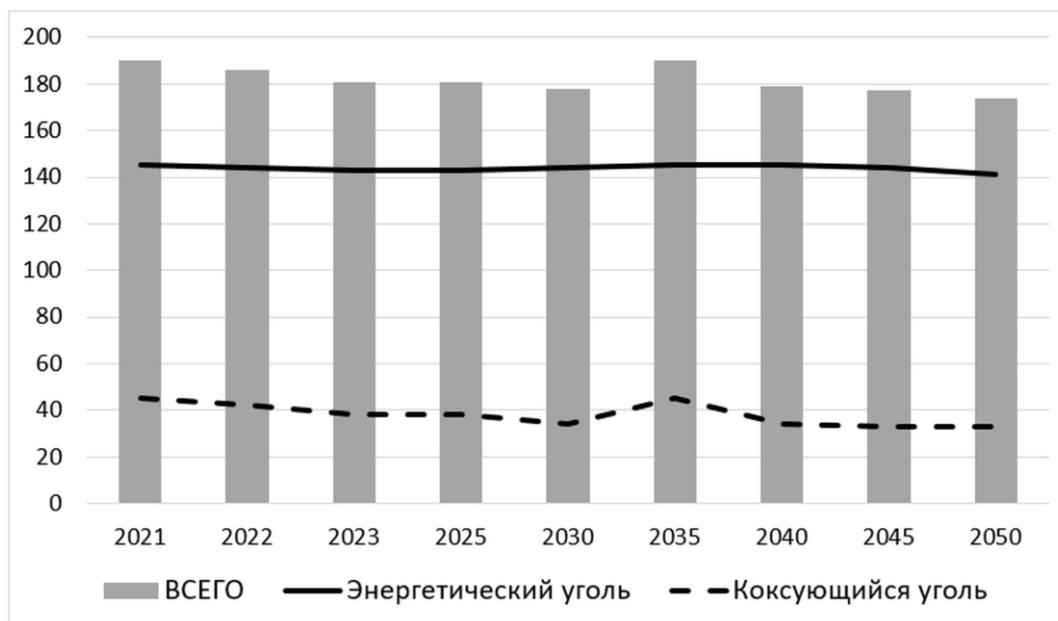


Рис. 3. Статистика и прогнозы спроса на уголь в России, млн т [11]
 Fig. 3. Statistics and forecasts of coal demand in Russia, million tons [11]

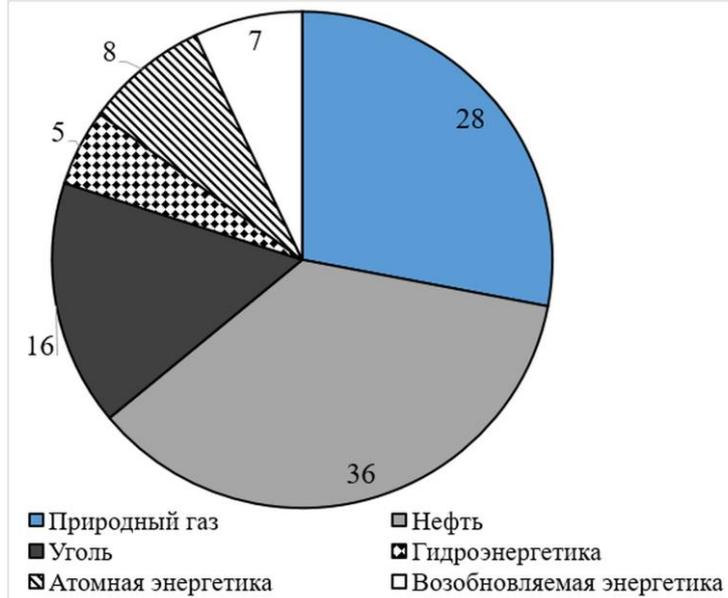


Рис. 4. «Энергетический микс» в энергопотреблении в государствах ОЭСР в 2019-2020 гг. [13]
 Fig. 4. "Energy mix" in energy consumption in OECD countries in 2019-2020 [13]

плане определяет достаточно стабильный спрос на уголь (до 2050 г.) – как в России, так и в мире в целом, несмотря на ожидаемый спад потребления в Евросоюзе и Китае (Рис. 2 и 3).

Как следует из данных, представленных на Рис. 2, несмотря на значительное снижение потребление угля в блоке стран Евросоюза, прогнозы по Индии и Китаю достаточно оптимистические, и общее потребление угля в данных странах к 2050 г. не ожидается ниже уровня 2020 г., с пиком в 2035-2040 гг.

В России спрос на уголь до 2050 г. также ожидается достаточно стабильным, и пик потребления также прогнозируется на 2035 г.

Вместе с тем усиление давления со стороны экологических (в частности, климатических) требований, связанных с выбросами CO₂, на добычу и сжигание угля, несомненно, окажет негативное воздействие на спрос на него. Поэтому переход к новой технологической платформе добычи угля второй половины 21 в. (Майнинг 5.0) должен обеспечить не только низкий уровень выбросов углерода, но и справедливый доступ к энергии («справедливый энергетический переход» [12]).

В целом по 38 странам Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР, англ. OECD, за вычетом России), в 2019-2020 гг. порядка 80% энергии («энергетический

микс») производится из ископаемых углеводородов, 16% – из угля (Рис. 4).

Поэтому технологическая платформа Майнинга 5.0 дает новые возможности минеральному сектору угледобычи повысить свою производительность и экологичность благодаря соединению человеческого творчества и производительности роботов при переходе от искусственного к добавленному интеллекту, от цифровых двойников к тройникам, от умных к коллаборативным роботам, от сетей 4G к 6G [14].

Технологии платформы Майнинга 5.0

Коллаборативные цифровые технологии Майнинга 5.0 рассматриваются как основное условие «бесшовного» Четвертого энергетического перехода с учетом реалий глобального энергетического рынка, таких как конкуренции между ископаемыми и возобновляемыми источниками энергии за рынок и инвестиции, за политические преференции и субсидии, а также требование равенства в доступе к энергии со стороны развивающихся стран [15]. Без интеграции



Рис. 5. Эволюция промышленных технологий Индустрии 1.0-5.0 (адаптировано авторами из: [17])

Fig. 5. Evolution of industrial technologies Industry 1.0-5.0 (adapted by authors from: [17])



Рис. 6. Цифровые двойники в Индустрии 5.0 (адаптировано авторами из: [18])

Fig. 6. Digital twins in Industry 5.0 (adapted by authors from: [18])

физического и киберпространства в Майнинге 5.0 невозможно построить энергосистему будущего, в которых экспоненциально растущая потребность в энергии в мире будет удовлетворяться на основе баланса ископаемых и возобновляемых энергоносителей [16]. В этом заключается человекоцентричность Майнинга 5.0, поскольку именно люди, а не роботы являются конечными потребителями энергии, и их энергетические и экологические запросы, в том числе в плане климатической стабильности, должны учитываться при проектировании горнодобывающих предприятий.

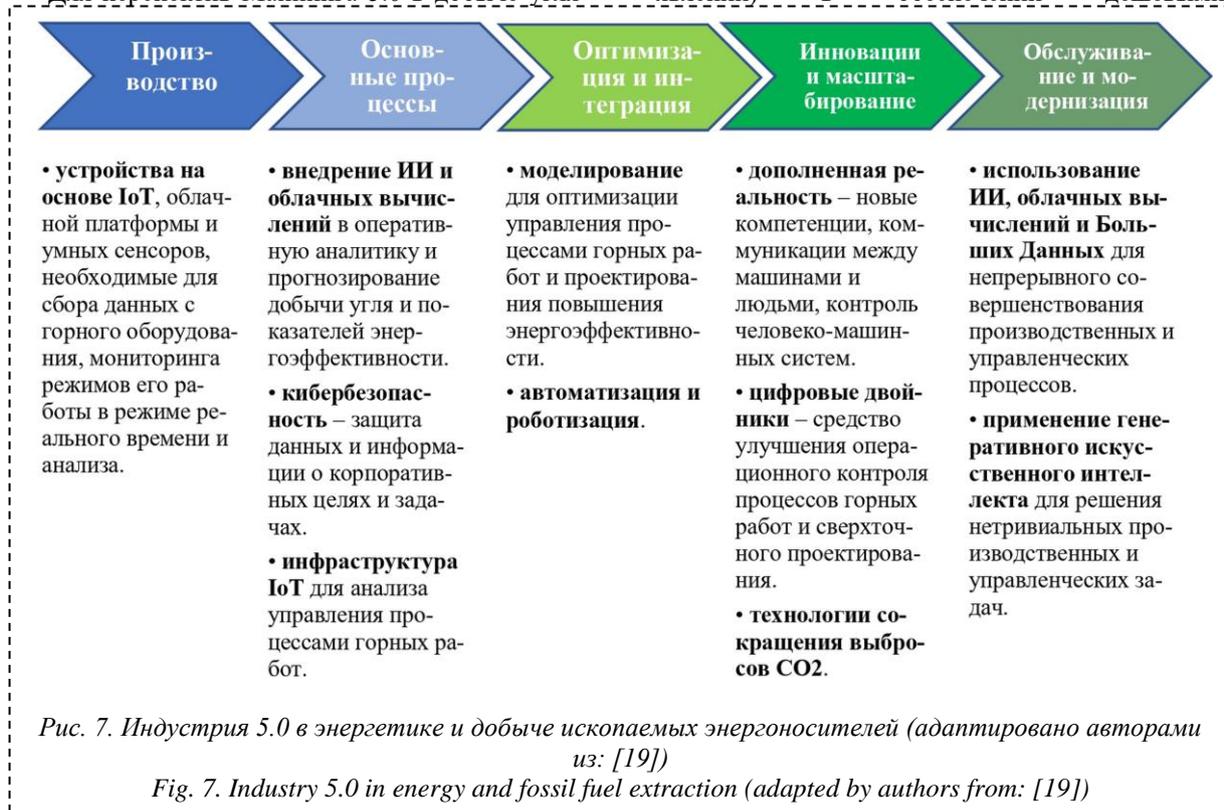
По мере того, как Майнинг 5.0 будет выстраиваться вокруг технологий Индустрии 5.0, принципы технологического развития горнодобывающей отрасли будут меняться в сторону приоритетного обеспечения поставок на мировой рынок доступного ископаемого энергоносителей, в т. ч. угля, и сокращения антропогенного воздействия его добычи и сжигания на окружающую среду, прежде всего на климат (Рис. 5).

Такое видение технологической платформы Майнинга 5.0 как основы устойчивого функционирования энергетической системы отдельных стран и всего мира должно быть дополнено цифровыми двойниками и тройниками физических процессов (Рис. 6), широкое использование которых необходимо для сбалансированного использования цифровых технологий Индустрии 5.0 и традиционной геотехнологии (открытой и подземной).

Для перспектив Майнинга 5.0 в добыче угля

широкое внедрение цифровых двойников и тройников означает, что коллаборация роботов и людей, занятых в различных процессах горных работ, должна иметь тот же технологический уровень, что и взаимодействие систем возобновляемой энергетики и электрических сетей, то есть использовать весь потенциал Индустрии 5.0, накопленный в ходе эволюции цифровых технологий Индустрии 4.0 (Рис. 7).

На Рис. 7 наглядно показан тот факт, что Индустрия 4.0 и 5.0 породили множество инновационных технологий для горнодобывающей промышленности, превратив предприятия в сложные цифровые системы – «ядро» платформы Майнинга 5.0. Коллаборация человека и роботов в добывающем секторе, осуществляемая сегодня на основе Индустрии 4.0, а с середины 21 в – на базе Индустрии 5.0 позволяет воспринимать Майнинг 5.0 как новый «производственный ландшафт» угольной отрасли. Под этим будем понимать сдвиг парадигмы производства и использования угля в сторону адаптивности, эффективности и устойчивости к флуктуации цен и измерения экологических, экономических требований, за счет интеллектуальной автоматизации и децентрализации, широкого использования человеко-машинных интерфейсов [20]. В свою очередь, соединение централизованных и децентрализованных систем управления процессами горных работ с использованием коллаборативного искусственного интеллекта позволит избежать «черных лебедей» (шоковых явлений) в обеспечении дешевыми



энергоносителями все более энергозависимого общества [21] и снизить риски, связанные с переходом от Индустрии 4.0 к 5.0 [22].

Детально технологическая платформа Майнинг 5.0 представляет собой отраслевой «срез» Индустрии 5.0 с акцентом на Больших промышленных Данных, виртуализации и моделировании производственных процессов, использовании Интернета Вещей для приложений в автоматизации, мониторинга в реальном времени и HMI/GUI, интеллектуальном производстве и промышленных киберфизических системах, микросетях энергоснабжения горных предприятий [23], аддитивному производству нового поколения – интеллектуально роботизированном выпуске горного оборудования [24]. Применительно к добыче угля как отрасли, связанной с производством дешевого энергоносителя и одновременно потреблением энергии, Индустрия 4.0 (Майнинг 4.0) призвана решить проблемы кибербезопасности, управления производственными цепочками и сетями, минимизации влияния человеческого фактора за счет технологической интеграции. В свою очередь, Индустрия 5.0 (Майнинг 5.0) должна привести в угольную отрасль предиктивное обслуживание оборудования, киберфизические умные системы и коллаборативные роботы как основу будущего витка комплексной механизации горных работ, обеспечивающей беспрецедентный рост удельной мощности и производительности оборудования.

Влияние рынков энергоносителей на переход к Майнингу 5.0

Переход к Майнингу 5.0 происходит в условиях неопределенности и волатильности цен на уголь (Рис. 8) и неопределенности будущих инвестиций в новые предприятия, рост добычи в которых может быть обусловлен только

интенсивными факторами – прорывами в цифровых технологиях создания и управления горными машинами, проектирования предприятий – ожидаемыми от Индустрии 5.0 [25].

Динамика мировых цен на уголь за 15 лет, представленная на Рис. 8, отражает прежде всего их колебания более чем в 5 раз, а также закрепление цен на более высоких отметках (порядка 150 долл. / т), чем в 2010-х гг. (в среднем порядка 75 долл. / т), после пандемийного шока 2020 г. Это формирует ценовый стимул будущих инвестиций в технологическую модернизацию угольной отрасли во всем мире, поскольку цифровые, производственные, управленческие и экологические инновации в Майнинге 5.0 существенно влияют на инвестиционную привлекательность добычи ископаемого топлива. Принятие инвестиционных решений в условиях неопределенности сроков и ожидаемого широкого временного интервала Четвертого энергетического перехода (консенсусный прогноз – 2030-2080-х гг., вплоть до начала 22 в. [27]) должно базироваться на основе учета многочисленных факторов, включая рыночную цену электроэнергии и угля, себестоимость его добычи, затраты на сокращения эмиссий парниковых газов, а также инвестиционные расходы предприятий и целых отраслей.

Внедрение цифровых человекоцентричных технологий Майнинга 5.0 обеспечивает проактивные и эффективные меры по интегрированному управлению предприятиями для повышения не только производительности труда, но и его безопасности, что соответствует идее о невозможности полного отказа от использования ископаемого топлива и желательности мер по смягчению последствий изменения климата, включая улавливание,

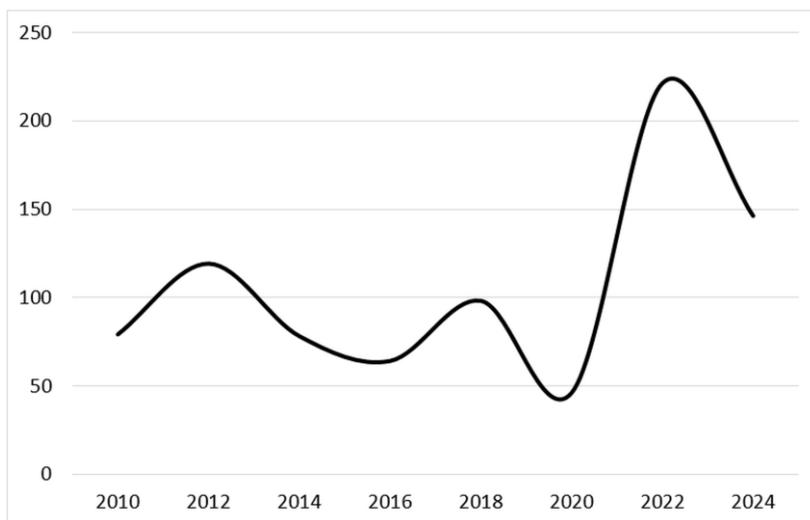


Рис. 8. Динамика мировых фьючерсных цен на уголь, долл. / т (построено авторами до данным: [26])

Fig. 8. Dynamics of world coal futures prices, USD/t (constructed by the authors based on data from [26])

утилизацию и хранение углерода, а также использование водорода, произведенного из угля [28]. Развитие передовых технологий улавливания и хранения CO₂ может обеспечить радикальное сокращение его эмиссий при более низких затратах. Это означает, что добывающий комплекс как главный бенефициар высоких цен на уголь способен сыграть важную роль в решении проблемы парниковых газов, одновременно снижая риск обесценивания своих активов, при условии окончательного перехода на платформу Майнинга 5.0. А отказ от добычи угля в пользу ядерной энергетики не способен компенсировать «провал» в энергообеспечении развивающихся стран даже в краткосрочной перспективе [29], тогда как исследования в области самоподдерживающейся термоядерной реакции «горящей плазмы» несут в себе критические экологические риски [30]. Это подтверждает идею о том, что цифровые коллаборативные технологии Индустрии 5.0 позволяют повысить производительность добычи угля на платформе Майнинга 5.0, однако сами по себе не дают альтернативу декарбонизации.

Рост мирового населения и экспансия цифровых технологий Индустрии 4.0, а в перспективе – Индустрии 5.0 в мировом топливно-энергетическом комплексе обуславливают экспоненциальный рост спроса на энергию. Это требует дополнительных инвестиций в возобновляемые источники энергии, которые могут удовлетворить глобальный спрос, не нанося вреда окружающей среде. Однако инвестиции в солнечную, ветровую и гидроэнергетику остаются высоко волатильными в плане доходности и рыночной стоимости портфелей [31]. Уже сегодня реализация принципов ESG в ряде стран Евросоюза привела к сокращению долгосрочных инвестиций в разведку и добычу угля и природного газа, что повлекло резкий рост цен на них на мировых рынках (Рис. 8). Критическими рисками здесь являются старение оборудования и медленная адаптация национальных энергетических систем к требованиям борьбы с изменением климата и декарбонизацией, включая отказ от угля. К настоящему моменту ископаемое топливо по-прежнему дает более 60% мирового производства электроэнергии, и инвестирование его добычи крайне важно для глобальной энергетической безопасности [32]. Сама идея движения к нулевым эмиссиям CO₂ к 2050 г. требует ежегодных инвестиций в возобновляемую энергетику более чем в 7 трлн дол., тогда как в энергетических программах и стратегиях на эти цели предусмотрены капиталовложения в объеме менее 2 трлн долл. в год [33]. Также следует принять во внимание

прогноз, согласно которому для развитых стран рост инвестиций в возобновляемые источники энергии замедляет экономический рост: в развитых странах повышение доходности таких капиталовложений на 1% снижает темпы экономического роста на 0,0001%, а в развивающихся странах – повышает на 0,001% [34].

В таких условиях развертывание Четвертого энергетического перехода на платформе Майнинга 5.0 подстегивается перераспределением субсидий в пользу отраслей, медленнее всего переходящих к возобновляемым источникам энергии и сокращению выбросов парниковых газов (производство стали, цемента и пр.) [35]. Правительства развивающихся стран также постепенно вводят субсидии, чтобы отрасли добычи ископаемого топлива использовали преимущества в инвестициях для предотвращения шоков предложения энергии [36]. Тем не менее, в результате давления на развивающиеся с страны с требованием сокращения выбросов CO₂ у них возникает дефицит энергии, особо остро ощущаемый странами Африки к югу от Сахары, который обусловлен высокими ценами на уголь и природный газ на фоне истощения близлежащих месторождений и технологического устаревания добычи в этих странах.

В целом принятие на себя развитыми странами жестких обязательств движения к нулевым эмиссиям CO₂ не смогли снизить инвестиции в добычу угля, во многом благодаря инновационному развитию угольной отрасли до уровня Индустрии 4.0, что создает технологический задел перехода к Майнингу 5.0. Поэтому мы оцениваем перспективы добычи угля на технологической платформе Майнинг 5.0 для «бесшовного» и безопасного Четвертого энергетического перехода как достаточно оптимистичные. Поскольку с Майнингом 5.0 связаны ожидания устойчивого удовлетворения энергетических потребностей в различных странах до конца 21 в., необходима быстрая адаптация традиционной геотехнологии (открытой, подземной) к массовому внедрению цифровых человекоцентричных технологий Индустрии 5.0.

Заключение

Технологии коллаборативной робототехники, промышленного Интернета Всего, цифровые двойники и тройники, генеративный искусственный интеллект и машинное обучение, анализ больших Данных и дополненная реальность способны вывести технологическую платформу добычи твердых полезных ископаемых Майнинг 5.0 на новый уровень как производственной, так и экологической эффективности, а также безопасности труда и бережливого производства. В результате рост

производительности и снижение себестоимости угля по мере роста объемов его добычи позволят стабилизировать выпуск и прибыль в отрасли в долгосрочной перспективе, сохранить ее привлекательность для инвесторов и обеспечить «бесшовный» Четвертый энергетический переход.

Ограничения использования ископаемых энергоносителей как основной концепт Четвертого энергетического перехода вызваны объективными (субсидии, инвестиции, прибыль) и субъективными факторами (законодательное сокращение добычи угля и общественное давление на развитие добычи твердых полезных ископаемых в целом). Вместе с тем опора на

человекоцентричные сверхвысокопроизводительные киберсистемы Майнинга 5.0 при реализации проектов развития действующих и разведке новых месторождений угля позволит приблизиться к низкому уровню эмиссий CO₂ и снизить риски кибербезопасности, возникающие при широком внедрении таких киберсистем, как цифровые тройники, предиктивная аналитика Больших Данных и машинное обучение, коллаборативные роботы. Наряду с этим внедрение генеративного искусственного интеллекта в системы управления отдельными машинами и целыми предприятиями угольной отрасли при переходе к Майнингу 5.0 позволит снизить подверженность их ценовым колебаниям и увеличить приток капитала.

В целом цифровые человекоцентричные технологии Майнинга 5.0 позволят сохранить место добычи угля в топливно-энергетическом балансе как развитых, так и развивающихся стран на уровне, обеспечивающем свободный доступ к дешевой энергии, спрос на которую будет только возрастать по мере углубления цифрового развития экономики и общества. От перехода добычи угля на платформу Майнинга 5.0 можно ожидать отход от признания отрасли как основного источника эмиссий CO₂ и негативного влияния на климат, с сохранением первого места в числе путей достижения целей Устойчивого развития, связанных со справедливым доступом к дешевой энергии для развитых и развивающихся стран.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shanmugam G. 200 Years of Fossil Fuels and Climate Change (1900-2100) // *Journal of the Geological Society of India*. 2023. Vol. 99. pp. 1043–1062.
2. Жиронкин С. А., Коновалова М. Е. Перспективы перехода к майнингу 5.0 – геотехнологии второй половины XXI В. // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2024. № 2 (162). С. 45–56.
3. Антошкин Р. В. Дискурс энергетического

перехода и его влияние на глобальную энергетическую политику // *Общество: политика, экономика, право*. 2023. №6 (119). С. 64–68.

4. ТАСС. ESG-повестка в России восстановила динамику с начала СВО. URL: <https://tass.ru/ekonomika/21969363> (последнее обращение: 02.10.2024).

5. Abas N., Kalair A., Khan N. Review of Fossil Fuels and Future Energy Technologies // *Futures*. 2015. Vol. 69. pp. 31–49.

6. Michaux S. P. Calculation of the Extra Capacity Required of Non-Fossil Fuel Power Generation Systems to Completely Phase Out Fossil Fuels // *Austin Environmental Sciences*. 2022. Vol. 7(1). Pp. 1071.

7. Sikirica A. Where are Fossil Fuels Displaced by Alternatives? // *World-Systems and Energy Transitions. Journal of world-systems research*. 2024. Vol. 30(1). Pp. 27.

8. Michaux S. Assessment of the Extra Capacity Required of Alternative Energy Electrical Power Systems to Completely Replace Fossil Fuels. Report number: 42/2021. Espoo: Geological Survey of Finland, 2021. 221 p.

9. Holechek J. L., Geli H. M. E., Sawalhah M. N., Valdez R. A Global Assessment: Can Renewable Energy Replace Fossil Fuels by 2050? // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Pp. 4792.

10. Консалтинговое агентство «Яков и Партнерь». Будущее угольной индустрии: рынок России до 2050 г. М., 2023. URL: https://yakov.partners/upload/iblock/ee5/hc32c9nsgb59mdchy1qj6l68pfa3ikv1/Budushchee-ugolnoy-industrii_mirovoy-rynok-do-2050-goda.pdf (последнее обращение: 02.10.2024).

11. Консалтинговое агентство «Яков и Партнерь». Будущее угольной индустрии: рынок России до 2050 г. М., 2023. URL: <https://yakovpartners.ru/publications/coal-industry-overview-russia/> (последнее обращение: 02.10.2024).

12. Игнатов А. А. Проблемы и перспективы реализации политики справедливого энергетического перехода в ЮАР // *Вестник международных организаций: образование, наука, новая экономика*. 2023. №4. С. 20–41.

13. Korobka R. V. The Global Dimension of Environmental Investment: Between Renewable Energy and Fossil Fuels // *Business Inform*. 2023. Vol. 12(551). Pp. 144–150.

14. Yadav R., Parwez Z., Parimala S., Priya U., Rathore S., Deepak S.S.K. Analysis and Prediction of Future Research Trends in the State of Industry 5.0 // *Social Science Journal*. 2023. Vol. 13(3). Pp. 2330–2340.

15. Meena M., Sharafuddin M. A., Wangtueai S. Impact of Industry 5.0 Readiness on Sustainable Business Growth of Marine Food Processing SMEs in Thailand // *Administrative Sciences*. 2024. Vol. 14. Pp. 110.

16. Maddikunta P.иK.иR., Pham Q.-V., Ba P.,

Deepa N., Dev K. Industry 5.0: A Survey on Enabling Technologies and Potential Application // Journal of Industrial Information Integration. 2021. Vol. 8. Pp. 257.

17. Mladineo M., Celent L., Milkovic V., Veza I. Current State Analysis of Croatian Manufacturing Industry with Re-gard to Industry 4.0/5.0 // Machines. 2024. Vol. 12. Pp. 87.

18. Yitmen I., Almusaed A. Synopsis of Industry 5.0 Paradigm for Human-Robot Collaboration. In book: Industry 4.0 Transformation towards Industry 5.0 Paradigm – Challenges, Opportunities and Practices. London: IntechOpen, UK, 2024. 238 p.

19. Introna V., Santolamazza A., Cesarotti V. Integrating Industry 4.0 and 5.0 Innovations for Enhanced Energy Management Systems // Energies. 2024. Vol. 17. Pp. 1222.

20. Абу-Абед Ф. Н. Применение технологий интеллектуального управления и бизнес-проектирования Индустрии 5.0 в Майнинге 5.0 // Экономика и управление инновациями. 2022. №3 (22). С. 50–59.

21. Гасанов Э. А. Новая форма соединения человека и машины в модели производства Индустрии 5.0 // Экономика и управление инновациями. 2022. №3 (22). С. 39–49.

22. Никитенко С. М., Гоосен Е. В. Апгрейд бизнес-моделей добывающих компаний в условиях Индустрии 4.0. и энергоперехода // Экономика и управление инновациями. 2021. №4 (19). С. 27–38.

23. Ямалтдинова Э. И. Человеко-машинный интерфейс // Достижения науки и образования. 2020. №11 (65). С. 10–12.

24. Тищенко И. В., Ванга Ю. В. Автоматизация и роботизация добычи твердых полезных ископаемых // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. №3. С. 325–333.

25. Lindroos T. J., Maki E., Koronen K., Hannula I., Kiviluoma J., Raitila J. Replacing fossil fuels with bioenergy in district heating – Comparison of technology options // Energy. 2021. Vol. 231. Pp. 120799.

26. Информационный портал «Trading Economics». Уголь – Фьючерсный контракт – Цены. URL: <https://ru.tradingeconomics.com/commodity/coal> (последнее обращение: 02.10.2024).

27. Тимофеева С. С., Смирнов Г. И. Перспективы использования угля как основного ресурса в условиях четвертого энергетического перехода // XXI век. Техносферная безопасность. 2023. №2 (30). С. 191–201.

28. Ахметова В. Р., Смирнов О. В. Улавливание и хранение диоксида углерода – проблемы и перспективы // Башкирский химический журнал. 2020. №3. С. 103–115.

29. Tsai B.-H., Huang Y.-M. Comparing the Substitution of Nuclear Energy or Renewable Energy for Fossil Fuels between the United States and Africa // Sustainability. 2023. Vol. 15. Pp. 10076.

30. Глянцев А. Энергия ожиданий: что стоит за бумом инвестиций в термоядерную энергетику // Forbes. 2021. 12 декабря. URL: <https://www.forbes.ru/society/449379-energia-ozidaniycto-stoit-za-bumom-investicij-v-termoadernuu-energetiku> (последнее обращение: 02.10.2024).

31. Зубакин В. А., Ковшов Н. М. Методы и модели анализа волатильности выработки ВИЭ с учетом цикличности и стохастичности // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2015. № (4). С. 86–98.

32. Komljenovic D., Kozarevic E., Avdic H., Suljic N., Softic A., Markovic O., Maric D. Asset Management as a Framework for Energy Transition of Power Utilities in Developing Countries. Paris : CIGRE Session, 2022. pp. 366–371.

33. Shirzadeh B., Leveque C., Carty C., Pradeep P., Jacamon V., Truby J., Lorentz B. Financing the green energy transition: A US\$50-trillion catch. New York : Deloitte, 2023, 52 p.

34. Кудрявцева О. В., Чернявский С. В., Уткина А. В. Экономический рост в развитых и развивающихся странах при переходе к возобновляемым источникам энергии // Экономика и математические методы. 2024. Том 60. № 2. С. 40–49.

35. Хмыз О. В. Проблемы финансирования глобального энергетического перехода // Экономика и управление. 2023. № 29(6). С. 621–629.

36. Ху Тинтин. Обзор национальных стратегий перехода к Индустрии 5.0 // Экономика и управление инновациями. 2022. № 3 (22). С. 28–38.

© 2024 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Жиронкин Сергей Александрович, доктор экономических наук, профессор, (Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: zhironkinsa@kuzstu.ru

Коновалова Мария Евгеньевна, доктор экономических наук, профессор, (Самарский государственный экономический университет, 443090, Россия, г. Самара, ул. Советской Армии, 141) e-mail: ecun@sseu.ru

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

Селюков Алексей Владимирович, доктор технических наук, доцент, (Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: sav.ormpi@kuzstu.ru

Буялич Геннадий Данилович, доктор тех. наук, профессор, (Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: gdb@kuzstu.ru

Заявленный вклад авторов:

Жиронкин Сергей Александрович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, работа с редакцией.

Коновалова Мария Евгеньевна – обзор существующей литературы, сбор и анализ данных, написание текста, оформление статьи по требованиям.

Жиронкина Ольга Валерьевна – сбор и анализ данных, написание текста, оформление статьи по требованиям.

Селюков Алексей Владимирович – сбор и анализ данных, написание текста, оформление статьи по требованиям.

Буялич Геннадий Данилович – сбор и анализ данных, написание текста, оформление статьи по требованиям.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

MINING 5.0 AS A TECHNOLOGICAL PLATFORM FOR COAL EXTRACTION IN THE FOURTH ENERGY TRANSITION

Sergey A. Zhironkin ¹, Maria E. Konovalova ²,
Olga V. Zhironkina ³, Alexey V. Selyukov ⁴,
Gennady D. Buyalich ⁵

¹ T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

² Samara State Economic University

³ Kemerovo State University

*for correspondence: ddm.tm@kuzstu.ru



Article info

Received:

02 October 2024

Accepted for publication:

22 November 2024

Accepted:

02 December 2024

Published:

05 December 2024

Keywords: Mining 5.0, geotechnology, Industry 5.0, coal mining, Fourth Energy

Abstract.

The article analyzes the role of Mining 5.0, a technological platform of the upcoming Fifth Industrial Revolution in the solid mineral extraction industries, in the implementation of a “seamless” Fourth Energy Transition, at the end of which renewable energy sources are expected to dominate in accordance with the UN Sustainable Development Goals related to reducing the negative impact on the climate and ensuring access to cheap energy. The article considers human-centric digital technologies characteristic of Mining 5.0 (industrial Internet of Everything, Digital Twins and Triplets of physical processes, Generative Artificial Intelligence, Collaborative Robots, etc.), which, when combined with traditional geotechnology (surface, underground), allow to radically increase labor productivity and reduce production costs, as well as reduce the negative impact on the environment, primarily greenhouse gas emissions. The need for technological transformation of coal mining to the level of Mining 5.0 is substantiated in order to prevent energy supply shocks, primarily in developing countries that are at the stage of accelerated industrialization with increasing energy consumption. The authors associate the increasing role of coal in the transition to renewable energy with the growth of its availability on a global scale, largely due to the improvement of its mining technologies on a new digital basis, up to the transition from unmanned machines and mechanisms

Transition

to smart robotization of mining enterprises and production chains for the extraction, enrichment and primary processing of fossil fuels

For citation: Zhironkin S.A., Konovalova M.E., Zhironkina O.V., Selyukov A.V., Buyalich G.D. Mining 5.0 as a technological platform for coal extraction in the fourth energy transition. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 6(166):120-132. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-6-120-132, EDN: ZZXXWW

REFERENCES

1. Shanmugam G. 200 Years of Fossil Fuels and Climate Change (1900-2100). *Journal of the Geological Society of India*. 2023; 99:1043–1062.
2. Zhironkin S.A., Konovalova M.E. Prospects for the Transition to Mining 5.0 - Geotechnology of the Second Half of the 21st Century. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2024; 2(162):45–56.
3. Antoshkin R.V. Discourse of the Energy Transition and its Impact on Global Energy Policy. *Society: Politics, Economics, Law*. 2023; 6 (119):64–68.
4. TASS. The ESG agenda in Russia has regained momentum since the beginning of the ESC. URL: <https://tass.ru/ekonomika/21969363> (last access: 02.10.2024).
5. Abas N., Kalair A., Khan N. Review of Fossil Fuels and Future Energy Technologies. *Futures*. 2015; 69:31–49.
6. Michaux S.P. Calculation of the Extra Capacity Required of Non-Fossil Fuel Power Generation Systems to Completely Phase Out Fossil Fuels. *Austin Environmental Sciences*. 2022; 7(1):1071.
7. Sikirica A. Where are Fossil Fuels Displaced by Alternatives? World-Systems and Energy Transitions. *Journal of world-systems research*. 2024; 30(1):27.
8. Michaux S. Assessment of the Extra Capacity Required of Alternative Energy Electrical Power Systems to Completely Replace Fossil Fuels. Report number: 42/2021. Espoo: Geological Survey of Finland; 2021. 221 p.
9. Holechek J.L., Geli H.M.E., Sawalhah M.N., Valdez R. A Global Assessment: Can Renewable Energy Replace Fossil Fuels by 2050? *Sustainability*. 2022; 14:4792.
10. Consulting agency "Yakov & Partners". The Future of the Coal Industry: the Russian Market until 2050. Moscow, 2023. URL: https://yakovpartners/upload/iblock/ee5/hc32c9nsgb59mdchy1qj6l68pfa3ikv1/Budushchee-ugolnoy-industrii_mirovoy-rynok-do-2050-goda.pdf (last accessed: 02.10.2024).
11. Consulting agency "Yakov & Partners". The Future of the Coal Industry: The Russian Market until 2050. Moscow, 2023. URL: <https://yakovpartners.ru/publications/coal-industry-overview-russia/> (last accessed: 02.10.2024).
12. Ignatov A.A. Problems and Prospects of Implementing the Policy of a Just Energy Transition in South Africa. *Bulletin of International Organizations: Education, Science, New Economy*. 2023; 4:20–41.
13. Korobka, R.V. The Global Dimension of Environmental Investment: Between Renewable Energy and Fossil Fuels. *Business Inform*. 2023; 12(551):144–150.
14. Yadav R., Parwez Z., Parimala S., Priya U., Rathore S., Deepak S.S.K. Analysis and Prediction of Future Research Trends in the State of Industry 5.0. *Social Science Journal*. 2023; 13(3):2330–2340.
15. Meena M., Sharafuddin M.A., Wangtueai S. Impact of Industry 5.0 Readiness on Sustainable Business Growth of Marine Food Processing SMEs in Thailand. *Administrative Sciences*. 2024; 14:110.
16. Maddikunta P.K.R., Pham Q.-V., Ba P., Deepa N., Dev K. Industry 5.0: A Survey on Enabling Technologies and Potential Application. *Journal of Industrial Information Integration*. 2021; 8:257.
17. Mladineo M., Celent L., Milkovic V., Veza I. Current State Analysis of Croatian Manufacturing Industry with Regard to Industry 4.0/5.0. *Machines*. 2024; 12:87.
18. Yitmen I., Almusaed A. Synopsis of Industry 5.0 Paradigm for Human-Robot Collaboration. In book: *Industry 4.0 Transformation towards Industry 5.0 Paradigm – Challenges, Opportunities and Practices*. London: IntechOpen; UK, 2024. 238 p.
19. Introna V., Santolamazza A., Cesarotti V. Integrating Industry 4.0 and 5.0 Innovations for Enhanced Energy Management Systems. *Energies*. 2024; 17:1222.
20. Abu-Abed F.N. . Application of intelligent management technologies and business design of Industry 5.0 in Mining 5.0. *Economy and Innovation Management*. 2022; 3(22):50–59.
21. Gasanov E.A. New form of connection of man and machine in the production model of Industry 5.0. *Economy and innovation management*. 2022; 3(22):39–49.
22. Nikitenko S. M., Goosen E.V. Upgrading business models of mining companies in the context of Industry 4.0. and energy transition. *Economy and Innovation Management*. 2021; 4(19):27–38.
23. Yamaltdinova E.I. Human-machine interface. *Achievements of science and education*. 2020; 11(65):10–12.
24. Tishchenko I.V., Vanag Yu.V. Automation and robotization of solid mineral extraction. *Interexpo Geo-Siberia*. 2022; 3:325–333.
25. Lindroos T.J., Maki E., Koponen K., Hannula I., Kiviluoma J., Raitila J. Replacing Fossil fuels with bioenergy in district heating – Comparison of technology options. *Energy*. 2021; 231:120799.
26. Information portal "Trading Economics". Coal – Futures contract – Prices. URL:

<https://ru.tradingeconomics.com/commodity/coal> (last accessed: 02.10.2024).

27. Timofeeva S.S., Smirnov G.I. Prospects for the Use of Coal as the Main Resource in the Conditions of the Fourth Energy Transition. XXI Century. *Technosphere Safety*. 2023; 2(30):191–201.

28. Akhmetova V.R., Smirnov O.V. Carbon dioxide capture and storage – problems and prospects. *Bashkir Chemical Journal*. 2020; 3:103–115.

29. Tsai B.-H., Huang Y.-M. Comparing the Substitution of Nuclear Energy or Renewable Energy for Fossil Fuels between the United States and Africa. *Sustainability*. 2023; 15:10076.

30. Glyantsev A. Energy of Expectations: What's Behind the Investment Boom in Thermonuclear Energy. *Forbes*. 2021. December 12. URL: <https://www.forbes.ru/society/449379-energia-ozidaniy-cto-stoit-za-bumom-investicij-v-termoadernuu-energetiku> (last accessed: 02.10.2024).

31. Zubakin V.A., Kovshov N.M. Methods and Models for Analyzing the Volatility of Renewable Energy Sources, Taking into Account Cyclicity and

Stochasticity. *Strategic Decisions and Risk Management*. 2015; (4):86–98.

32. Komljenovic D., Kozarevic E., Avdic H., Suljić N., Softic A., Markovic O., Maric D. Asset Management as a Framework for Energy Transition of Power Utilities in Developing Countries. Par-is: CIGRE Session; 2022. Pp. 366–371.

33. Shirizadeh B., Leveque C., Carty C., Pradeep P., Jacamon V., Truby J., Lorentz B. Financ-ing the green energy transition: A US\$50-trillion catch. New York: Deloitte; 2023, 52 p.

34. Kudryavtseva O.V., Chernyavsky S.V., Utkina A.V. Economic growth in developed and developing countries during the transition to renewable energy sources. *Economics and mathematical methods*. 2024; 60(2):40–49.

35. Khmyz O.V. Problems of Financing the Global Energy Transition. *Economics and Management*. 2023; 29(6):621:629.

36. Hu Tingting. Review of National Strategies for the Transition to Industry 5.0. *Economics and Innovation Management*. 2022; 3 (22):28–38.

© 2024 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Sergey A. Zhironkin, Dr. Sc. in Economics, Professor, (T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya st., 28), e-mail: zhironkinsa@kuzstu.ru

Maria E. Konovalova, Dr. Sc. in Economics. Sciences, Professor, (Samara State Economic University, 443090, Russia, Samara, Krasnoy Armii st., 141), e-mail: ecun@sseu.ru

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

Alexey V. Selyukov, Dr. Sc. in Engineering, Assistant Professor, (T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya st., 28), e-mail: sav.ormpi@kuzstu.ru

Gennady D. Buyalich, Dr. Sc. in Engineering, Professor, (T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya st., 28), e-mail: gdb@kuzstu.ru

Contribution of the authors:

Sergey A. Zhironkin – review of existing literature, formulation of a research task, scientific management, working with the editorial board.

Maria E. Konovalova – review of existing literature, data collection and analysis, writing a text, formatting an article according to requirements.

Olga V. Zhironkina – data collection and analysis, writing a text, formatting an article according to requirements.

Alexey V. Selyukov – data collection and analysis, writing a text, formatting an article according to requirements.

Gennady D. Buyalich – data collection and analysis, writing a text, formatting an article according to requirements.

All authors have read and approved the final manuscript.

