

# Декарбонизация горной промышленности России

Марк Леонтьевич ХАЗИН\*

Рафаил Абдрахманович АПАКАШЕВ\*\*

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

## Аннотация

**Цель и актуальность работы.** Интенсивное промышленное развитие, зависящее от ископаемого топлива, привело к критическому накоплению атмосферного углекислого газа и повышению температуры поверхности Земли. Дальнейшее увеличение температуры планеты на 2 °С может привести к повышению уровня Мирового океана на 6 м, что вызовет рост числа наводнений и ураганов, а таяние вечной мерзлоты создаст угрозу для инфраструктуры заполярных городов. Все эти факторы приведут к значительным убыткам, поэтому решение о декарбонизации соответствует национальным интересам России. Целью исследований является поиск путей снижения вредных выбросов в горной промышленности.

**Методология.** По отчетным данным осуществляются критический анализ и изучение возможностей уменьшения выброса парниковых газов в процессе добычи полезных ископаемых.

**Результаты и область применения.** Горнодобывающая промышленность является основным источником сырья для обрабатывающей промышленности, транспорта, металлургии, строительства и энергетики. Снижение содержания полезных компонентов в руде вызывает необходимость добывать, загружать, транспортировать и обрабатывать больше материалов. В краткосрочной перспективе невозможно отказаться от использования ископаемого топлива, но можно рассмотреть основные методы стратегии декарбонизации горнодобывающих компаний: электроснабжение на месте, сокращение потребления дизельного топлива для транспортировки горной массы, совершенствование технологии обработки, улавливание и хранение углерода. Для этого в горнодобывающей промышленности можно использовать различные резервы в виде экологически чистых энергетических решений, таких как энергоэффективность, рекуперация энергии, возобновляемые источники энергии и улавливание углерода.

**Выводы.** В горнодобывающей промышленности можно использовать различные экологически чистые энергетические решения, например, энергоэффективность, рекуперация энергии, возобновляемые источники энергии и улавливание углерода. Для полного решения энергетических проблем, стоящих перед горнодобывающей отраслью, потребуется сочетание экологически чистых энергетических технологий.

**Ключевые слова:** декарбонизация, климат, открытые горные работы, парниковые газы, ресурсосбережение, экология, экономика, энергоэффективность.

## Введение

Интенсивное промышленное развитие, традиционно зависящее от сжигания ископаемого топлива, привело к критическому накоплению углекислого газа в атмосфере. Антропогенные выбросы парникового газа значительно повысили концентрацию CO<sub>2</sub> в течение XX в. до 408 частей на миллион (ppm) в ноябре 2018 г. по сравнению с менее чем 300 частями на миллион в XIX в. [1]. Кроме того, в течение XX в. была вырублена примерно половина лесов планеты, а в наше время скорость уничтожения лесов составляет почти 1,4 млн км<sup>2</sup>/десятилетие. Согласно докладом экспертов Международной группы по изменению климата (МГЭИК), по мере увеличения количества CO<sub>2</sub> в атмосфере из-за антропогенной деятельности природные экосистемы теряют способность поглощать весь выделяемый парниковый газ (ПГ).

В течение последних десятилетий температура поверхности Земли неуклонно повышалась и составила 1,1 °С за прошедшие 150 лет [2–4], что связывают с уве-

личением выбросов CO<sub>2</sub> за это время. Увеличение температуры планеты только на 2 °С приведет к повышению уровня Мирового океана на 6 м. При сохранении существующих тенденций катастрофические последствия изменения климата могут произойти уже к концу XXI в. [5, 6]. Поэтому проблема начинающегося изменения климата, которая затрагивает экономические интересы не только отдельных компаний, но уже и государств, постепенно переходит из научной (экологической) области в сферу бизнеса и политики [1, 3].

Согласно отчету “BP Statistical Review of World Energy” (BP), совокупный мировой объем выбросов CO<sub>2</sub> в 2019 г. достиг 34,2 млрд т. Основная доля повышения количества выбросов приходится на развивающиеся страны (+2,4 %), тогда как Европейский союз (с учетом Великобритании) снизил выбросы на 3,9 % (рис. 1). Однако в настоящее время для замещения российских поставок газа в Германии

✉ Khasin@ursmu.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-6081-4474>

\*\*parknedra@yandex.com

 <https://orcid.org/0000-0002-9006-3667>

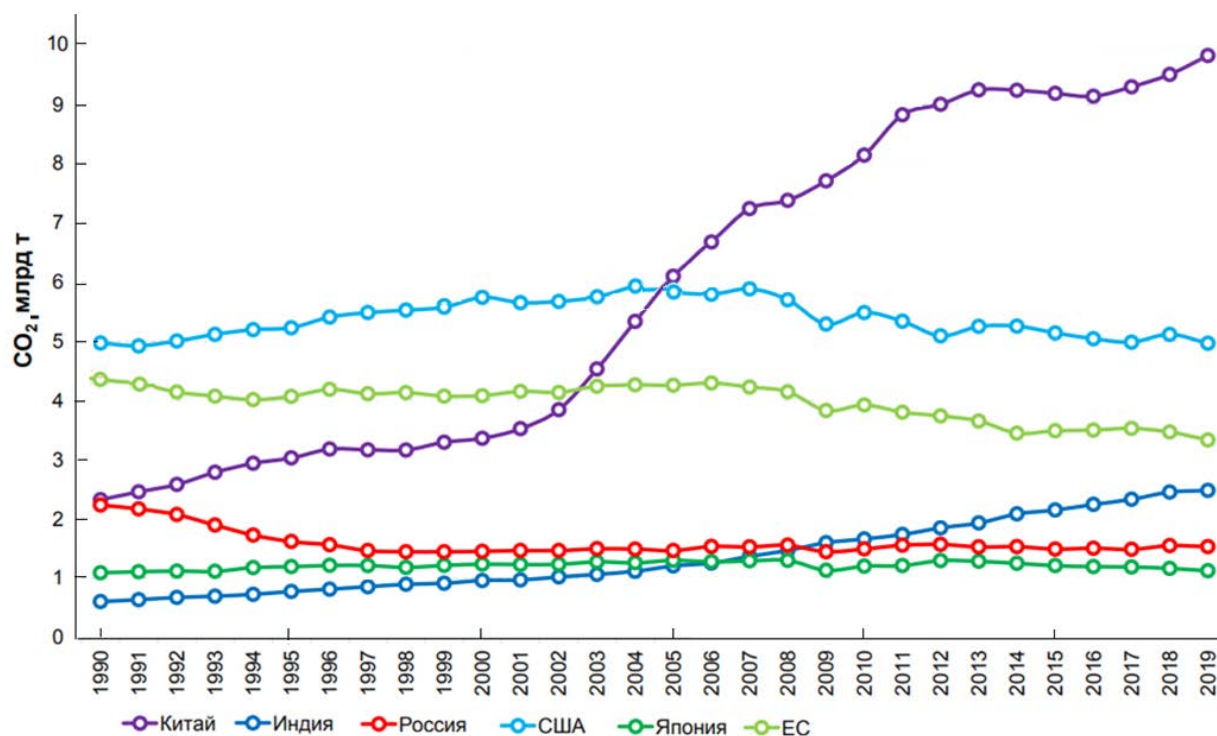


Рисунок 1. Выбросы CO<sub>2</sub> по ведущим странам и регионам мира, млрд т. 1990–2019 г. Источник: BP Statistical Review of World Energy 2020

Figure 1. CO<sub>2</sub> emissions by leading countries and regions of the world, billion tons. 1990–2019. Source: BP Statistical Review of World Energy 2020

и других европейских странах ожидается введение в эксплуатацию ТЭЦ и увеличение потребления угля на 35 % в 2022 г. по сравнению с 2021 г. При этом объем выбросов парниковых газов для производства 1 кВт × ч электроэнергии будет почти вдвое больше, чем при использовании природного газа.

Горнодобывающая промышленность является основным источником сырья для обрабатывающей промышленности, транспорта, металлургии, строительства и энергетики. По экспертным прогнозам, спрос на сырье будет расти по мере увеличения населения мира и перехода многих стран с низкими доходами к статусу со средними доходами. Такое повышение спроса на полезные ископаемые в сочетании с падением содержания в минеральной руде, вероятно, увеличит потребность горнодобывающей промышленности в энергии, что потенциально приведет к увеличению и без того значительного воздействия парниковых газов [7–9]. В настоящее время доля выбросов парниковых газов мировой горнодобывающей промышленности составляет 4–7 %, основная часть которой приходится на угольный сектор.

На Парижском совещании по изменению климата в 2015 г. 195 государств-членов ООН согласились принять меры по ограничению роста средней глобальной температуры ниже 2 °С к 2100 г. Однако даже если все страны, подписавшие соглашение, успешно выполнят Парижское соглашение, прогнозируется, что к концу столетия глобальная температура повысится как минимум на 2,6 °С. Начиная со второй половины 1970-х гг. среднегодовая температура воздуха на территории России повышается в среднем на 0,47 °С за 10 лет, что в 2,5 раза больше роста

средней глобальной температуры воздуха [10]. Планетарное потепление создает существенные угрозы для многих стран, в том числе и для России. Изменение климата приводит к увеличению числа наводнений, ураганов, засух также и на плодородных территориях России. Кроме того, таяние вечной мерзлоты создает угрозы для инфраструктуры заполярных городов. Все эти факторы приведут к значительным убыткам, поэтому вопрос декарбонизации для мирового сообщества является основным.

**Теория вопроса.** Добыча полезных ископаемых является очень энергоемкой как на начальном этапе разработки, так и на протяжении всего срока службы шахты, рудника или карьера. Энергия – одна из основных статей расходов в горнодобывающей промышленности, составляющая в среднем от 15 до 40 % общих операционных расходов. При такой большой доле расходов, затрачиваемых на производство энергии, получаемой из ископаемых видов топлива, горнодобывающая промышленность в значительной степени подвержена волатильности рынка ископаемых видов топлива. Ожидается, что к 2035 г. спрос на энергию при добыче полезных ископаемых вырастет на 36 % [7, 11]. Вследствие удаленности большинство горнодобывающих предприятий в значительной мере зависит от ископаемых видов топлива (угля и нефти) для выработки электроэнергии и тепла на месте.

Помимо экономических последствий, зависимость добычи полезных ископаемых от ископаемых видов топлива также влияет на благосостояние местных сообществ и имеет последствия для местной инфраструктуры, качества воздуха и воды. Экономические, социальные и экологические факторы побуждают пересмотреть спо-

события производства и использования энергии на горнодобывающих предприятиях. Основными тенденциями и проблемами, повышающими интерес к использованию альтернативных источников энергии в горнодобывающей промышленности, являются:

1. Снижение содержания руды (истощение богатых и легкодоступных руд привело к снижению содержания руды), следовательно, необходимо добывать, загружать, транспортировать и обрабатывать больше материалов для производства того же количества металла или минералов. Это увеличивает потребность в энергии для горных работ. Например, при снижении содержания медной руды с 0,4 до 0,2 % требуется в семь раз больше энергии [4, 7, 9] и, соответственно, новых инвестиций в энергетические услуги. При этом горнодобывающая промышленность сталкивается с двойной проблемой: поиска мер по декарбонизации и перспективы роста спроса на энергию [12]. Кроме того, увеличивающаяся удаленность горных предприятий создает проблемы для обеспечения поставок энергии в виде доступных видов топлива, транспортных потребностей, доступа к площадкам и мер инфраструктуры и других логистических соображений;

2. Неустойчивые цены (горнодобывающая промышленность постоянно сталкивается с колебаниями цен на энергоносители и полезные ископаемые, что влияет на себестоимость продукции). Ископаемые виды топлива составляют 57 % мирового потребления энергии в горнодобывающем и карьерном секторах (33 % – нефтепродукты, 13 % – уголь и 11 % – природный газ). Таким образом, альтернативные источники энергии могут обеспечить стабильность стоимости энергии;

3. Экологические проблемы. Добыча полезных ископаемых оказывает негативное воздействие на окружающую среду как на глобальном, так и на местном уровне: загрязнение почвы, атмосферы и водных источников [13–16]. Эти воздействия возрастают по мере того, как промышленность ведет поиск более трудноизвлекаемых минеральных ресурсов в экологически уязвимых районах;

4. Растущее политическое и социальное беспокойство. Помимо экономических последствий, зависимость добычи полезных ископаемых от ископаемых видов топлива также влияет на благосостояние местных сообществ и имеет последствия для местной инфраструктуры, качества воздуха и воды, а также окружающей среды. Кроме того, горнодобывающая промышленность испытывает растущее давление со стороны акционеров и внешних заинтересованных сторон с целью снижения зависимости от ископаемого топлива на всех этапах цепочки поставок [17].

При этом следует отметить, что добытое полезное ископаемое – это не конечный продукт, а всего лишь сырье, т. е. только начало совместной цепочки создания добавленной стоимости, цепочки, которая в конечном итоге ведет к потребителю. Поэтому необходимо переходить к циркулярной модели производства [18–20]. В этом случае следует говорить не о торговле продукцией, а о бизнес-моделях переработки товара и поддержки его в обращении.

Таким образом, декарбонизация горнодобывающего сектора тесно связана с моделями потребления энергии и энергетическими целями горнодобывающих компаний.

#### Обсуждение результатов

В соответствии с Парижским соглашением 2015 г. 195 стран обязались ограничить глобальное потепление, сделать его значительно ниже 2,0 °С к 2050 г. Для достижения этой цели горнодобывающая промышленность должна сократить прямые выбросы CO<sub>2</sub> как минимум на 85 % [2, 5, 12]. Для этого в экономически развитых странах были реализованы различные варианты регулирования выбросов ПГ и приняты меры по их уменьшению. После распада СССР Россия становится одним из мировых лидеров по снижению выбросов парниковых газов (рис. 1), поскольку большинство советских предприятий были закрыты в 1990-е гг.

В 1990-х гг. в России существенно снизился объем выбросов вследствие экономической ситуации в стране, изменения структуры экономики и топливного баланса. В 1999–2008 гг. начался экономический подъем в сферах производства и потребления. Этот период сопровождался увеличением объема выбросов, который был существенно меньше их сокращения в 1990-е гг. Если в 1990–1998 гг. объем совокупного выброса (без учета сектора землепользования, изменения землепользования и лесного хозяйства (ЗИЗЛХ)) уменьшился на 1308,2 млн т CO<sub>2</sub>-экв., то в 2000–2008 гг. он увеличился всего на 197,4 млн т CO<sub>2</sub>-экв. (рис. 2). Кроме того, значительную часть энергии в России получают с помощью природного газа как наименее «грязного» вида ископаемого топлива и АЭС, не оставляющих углеродного следа.

В 2009 г., в связи с мировым экономическим кризисом, затронувшим и Россию, наблюдалось снижение объема выбросов. В 2010–2012 гг. (период восстановления экономики) объем выбросов снова начал возрастать. В 2018 г. совокупные выбросы с учетом ЗИЗЛХ составили 1,6 млрд т CO<sub>2</sub>-экв. (или 52,4 % совокупных выбросов 1990 г.). Выбросы ПГ с учетом ЗИЗЛХ ниже, поскольку сектор ЗИЗЛХ России является нетто-поглотителем ПГ<sup>1</sup>.

Большинство мировых горнодобывающих компаний уже начали свой путь к достижению нулевого уровня выбросов к 2050 г. В краткосрочной перспективе такие компании, как BHP и Vale, планируют сократить выбросы примерно на 30 % к 2030 г.; Rio Tinto поставила перед собой цель сократить выбросы на 50 % [12]. Данные по выбросам парниковых газов в пересчете на углекислый газ-эквивалент горно-металлургическими предприятиями России представлены на рис. 3, 4.

Указом Президента Российской Федерации от 04.11.2020 № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов» поставлена задача – к 2030 г. «уменьшить» выбросы на 30 % от уровня 1990 г. и до 70 % в масштабе всей экономики с учетом максимально возможной поглощающей способности лесов и других экосистем. То есть де-факто увеличить их почти на 40 % от текущего уровня [21, 22].

По мнению международных экспертов, в краткосроч-

<sup>1</sup> Четвертый двухгодичный доклад Российской Федерации, представленный в соответствии с решением 1/CP.16 Конференции Сторон Рамочной Конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. URL: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/10469275\\_Russian%20Federation-BR4-1-4BR\\_RUS.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/10469275_Russian%20Federation-BR4-1-4BR_RUS.pdf)

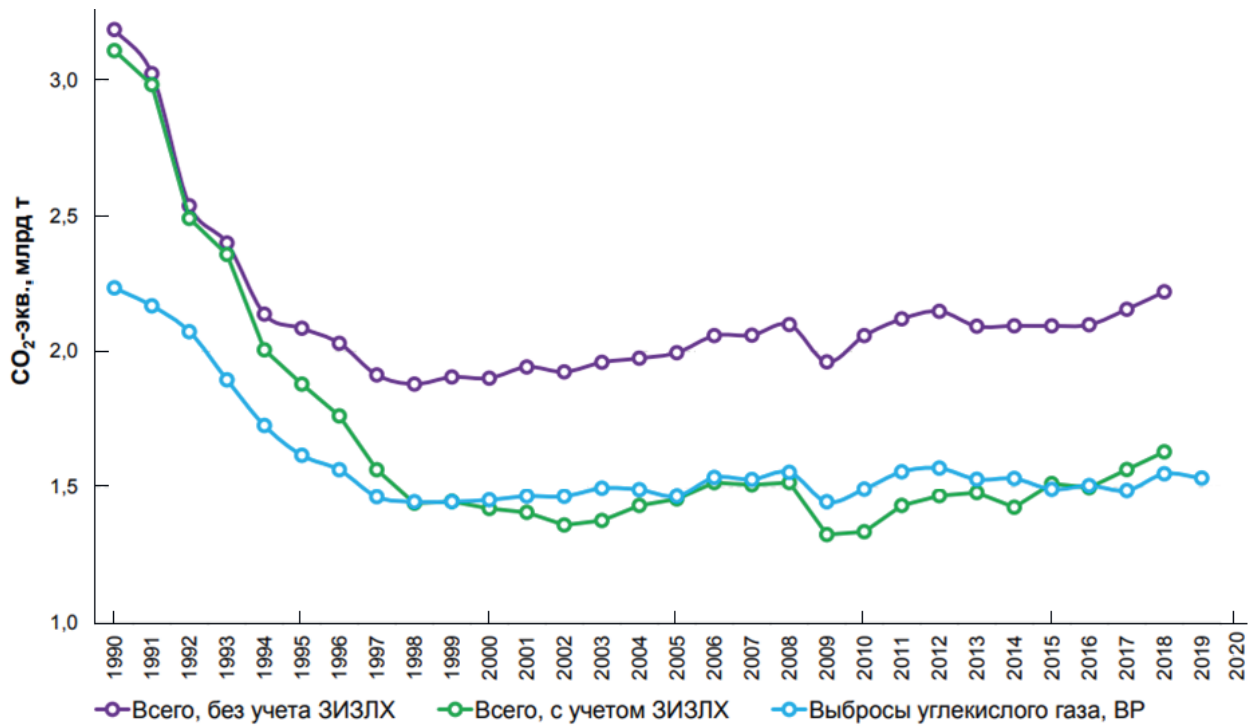


Рисунок 2. Совокупные антропогенные выбросы парниковых газов в России, млрд т CO<sub>2</sub>-экв. 1990–2019 г. Источник: BP Statistical Review of World Energy 2020 (Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990–2018 гг., с. 24)  
 Figure 2. Cumulative anthropogenic greenhouse gas emissions in Russia, billion tons of CO<sub>2</sub>-eq. 1990–2019. Source: BP Statistical Review of World Energy 2020 (National Inventory Report on Anthropogenic Emissions by Sources and Removals by Sinks of Greenhouse Gases Not Controlled by the Montreal Protocol, 1990–2018, p. 24)

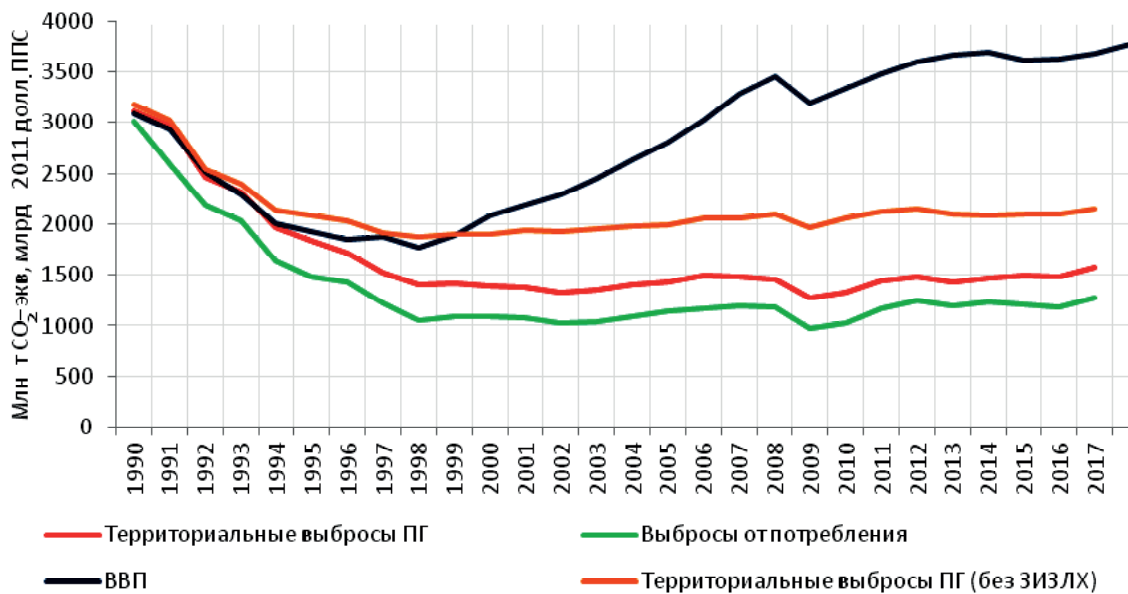


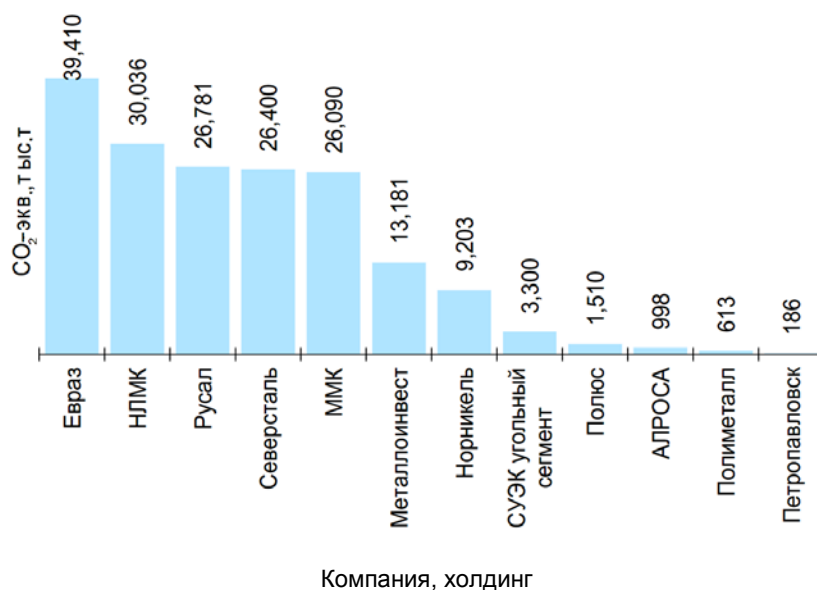
Рисунок 3. Динамика суммарных показателей выбросов ПГ и динамика ВВП Российской Федерации в 1990–2018 гг. Источники: рассчитано ЦЭНЭФ-ХХI на основе данных Росстата и национальной инвентаризации (Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990–2017 гг. М., 2019)  
 Figure 3. Dynamics of total indicators of GHG emissions and dynamics of the GDP of the Russian Federation in 1990–2018. Calculated by CENEf-XXI based on data from Rosstat and the national inventory (National report on the inventory of anthropogenic emissions from sources and removals by sinks of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol for 1990–2017. Moscow 2019)

ной перспективе невозможно отказаться от использования ископаемого топлива и перейти на возобновляемые источники энергии без серьезных экономических потрясений [1, 23, 24]. Тем не менее, с точки зрения минимизации выбросов, можно рассмотреть следующие основные

методы, которые могут быть включены в стратегию декарбонизации горнодобывающих компаний.

1. *Электроснабжение на месте.* Доступ к электричеству имеет основополагающее значение для работы любого рудника, карьера или шахты. Способ и тип получаемой





**Рисунок 4. Выбросы сферы охвата 1 компаний горно-металлургического сектора, 2020 г. Источник: Цена декарбонизации для экономики России. URL: [http://www.forecast.ru/\\_ARCHIVE/Presentations/CMASF\\_SM/dec2021/SVV.pdf](http://www.forecast.ru/_ARCHIVE/Presentations/CMASF_SM/dec2021/SVV.pdf)**  
**Figure 4. Emissions from the scope of 1 companies in the mining and metallurgical sector, 2020. Source: The cost of decarbonization for the Russian economy. URL: [http://www.forecast.ru/\\_ARCHIVE/Presentations/CMASF\\_SM/dec2021/SVV.pdf](http://www.forecast.ru/_ARCHIVE/Presentations/CMASF_SM/dec2021/SVV.pdf)**

электроэнергии могут иметь огромное значение с точки зрения энергоэффективности и выбросов. Например, компания ВНР согласилась заключить контракты на возобновляемые источники энергии для своих двух шахт в Чили, что приведет к 20-процентному снижению цены, но, что более важно, вытеснит 3 млн т выбросов CO<sub>2</sub>, которые в противном случае выбрасывали бы угольные электростанции [7, 11].

2. *Сокращение дизельного топлива для транспортировки горной массы.* Большинство горнодобывающих машин и оборудования используют дизельные двигатели. В настоящее время в мире работает около 28 000 карьерных самосвалов, дизельные двигатели которых выбрасывают 68 млн т CO<sub>2</sub> в год [25, 26]. Самосвал, получающий энергию от дизельного генератора, а не от дизельного двигателя, дает в три раза меньше выбросов по сравнению с обычным дизельным карьерным самосвалом, учитывая рекуперацию. Таким образом, даже если электросеть питается от «грязной» энергии, применение дизель-троллейбусов и троллейбусов позволяет экономить до 80 % дизельного топлива [27, 28]. Newmont и Fortescue Metals Group (FMG) рассматривают в качестве альтернативных видов топлива водород и электроаккумуляторы. FMG использует водород в качестве топлива для большинства своего горнодобывающего оборудования, как и производители грузовых автомобилей (Huzon), которые уже работают в Австралии [29, 30]. Промежуточный вариант – это переход на природный газ, поскольку газовое моторное топливо дает значительно меньший объем выбросов [31], особенно это касается северных районов России [32].

Еще один путь – это замена карьерных самосвалов ленточными конвейерами, которые намного эффективнее перемещают добытый материал [7, 33].

3. *Технология обработки.* Современные процессы дробления и измельчения полезных ископаемых требуют либо большого количества дизельного топлива, либо

электроэнергии, что эквивалентно 1 % общего потребления энергии во всем мире. Следовательно, изменение технологии измельчения является естественной целью для наиболее эффективных возможностей экономии энергии. Даже небольшие улучшения технологии могут привести к относительно большой экономии как энергопотребления, так и выбросов парниковых газов [7, 11].

4. *Цифровизация горной промышленности.* За последнее десятилетие горняки начали широкомасштабно внедрять системы внутрикарьерного дробления и транспортировки (IPCC), заменяя свои автопарки, работающие на ископаемом топливе, непрерывной транспортировкой материала на ленточных конвейерах с электроприводом. Положительное воздействие этих систем на окружающую среду значительно, а использование систем IPCC повышает степень автоматизации и цифровизации, обеспечивая дополнительную эффективность.

Цифровая повестка дня приобретает все большее значение для добычи полезных ископаемых с точки зрения производительности, но преимущества также будут видны в плане устойчивости. Используя достижения в области цифровых технологий, можно подключать, собирать и прогнозировать производственные данные для оптимизации процессов – сокращения отходов и воды, выбросов и потребления энергии [34, 35].

5. *Улавливание и хранение углерода.* Улавливание, использование и хранение углерода (CCUS) – это новая стратегия, которая зарекомендовала себя как многообещающий инструмент в качестве долгосрочного решения проблемы выбросов CO<sub>2</sub>. Газообразный углекислый газ веками использовался в качестве сырья в промышленных процессах. Область его применения простирается от газирования напитков (XVIII в.) до применения сверхкритического CO<sub>2</sub> в производстве растворимого кофе, фармацевтических препаратов (XX в.) или строительных материалов (XXI в.). Склонность минералов вступать в

реакцию с  $\text{CO}_2$  при правильно выбранных условиях может быть использована для CCUS с применением методов обработки как *in situ*, так и *ex situ*. В качестве примера первого сообщают об использовании жидкости с высоким содержанием  $\text{CO}_2$  вместо природной воды при обработке перидотитов. При таком подходе растворение перидотита (и, следовательно, его карбонатность) можно увеличить на пять порядков [1, 36].

Российские компании также предполагают инвестировать CCUS. Например, Газпром планирует вложить 30 млрд руб. в проект по улавливанию и захоронению углерода на территории Оренбургской области. НОВАТЭК и Татнефть также заявили о готовности реализации аналогичных проектов. На предприятиях группы «АЛРОСА» изучают возможности кимберлитовой породы поглощать углекислый газ из атмосферы и сохранять его в составе карбонатов [37]. В границах национального парка «Угра» (Калужская область) с 2020 г. внедряются карбоновые фермы, т. е. лесные технологии, направленные на поглощение парниковых газов. В России примерно 11 млн км<sup>2</sup> лесных массивов, являющихся уникальным резервуаром для поглощения  $\text{CO}_2$ .

Аналитики ЕУ полагают, что нефтегазовые компании СНГ могут проводить мероприятия по снижению выбросов  $\text{CO}_2$  в процессе своей основной деятельности. Например, снизить количество сжигания попутного газа (несмотря на действующее с 2012 г. постановление об утилизации 95 % ПНГ, средний показатель по России в 2020 г. – 82,6 %), а также снизить утечки метана (в частности, на заброшенных скважинах), отрицательное влияние которого на климат в 26–28 раз сильнее, чем у углекислого газа.

В ходе своего развития мировая экономика прошла через несколько энергетических переходов: древесный–каменный уголь–нефть–природный газ. Если первые энергетические переходы были обусловлены удобством производства и конкурентоспособностью затрат, то сейчас в первую очередь рассматриваются экологические параметры энергоносителей. Перевод всего мирового потребления энергии с ископаемого топлива в гонке со временем, чтобы избежать катастрофических изменений климата, выходит за рамки всего, что человечество пыталось сделать раньше.

Нынешний энергопереход (уход от ископаемого топлива) потребует значительных вложений, но при этом открываются новые рынки продуктов, технологий и услуг. Важно отметить, что здесь имеются направления, где Россия может не только извлечь выгоду из

нового энергоперехода, но и занять лидирующие позиции. Это, например, экспорт аммиака в качестве сырья для производства водорода и производство водорода из природного газа, а также продажа редкоземельных металлов. Кроме того, можно увеличить инвестиции в лесопосадки, что позволит в большей мере использовать поглощающую способность лесов и сибирской тайги. Это значительное конкурентное преимущество, поскольку мы больше поглощаем, чем выбрасываем. Поэтому можно сказать, что Россия – экологический «донор» планеты. Однако в настоящее время площадь лесов уменьшается из-за частых пожаров на Дальнем Востоке и в Сибири.

#### Заключение

Горнодобывающая отрасль имеет ключевое значение для экономического развития во всем мире, поскольку именно она поставляет критически важные минералы, обеспечивающие возможность перехода на низкоуглеродные технологии, необходимого для остальной части экономики. Однако условия, в которых ей предстоит работать в перспективе, будут сильно отличаться от прошлого, требуя комплексных изменений и существенных капиталовложений. Иными словами, горнодобывающей отрасли нужно стать более экологически устойчивой и эффективной, если от нее будет требоваться предоставление важнейших ресурсов, необходимых миру для декарбонизации, снижая при этом свое собственное влияние на окружающую среду.

В принципе, в горнодобывающей промышленности можно использовать множество экологически чистых энергетических решений, таких как энергоэффективность, рекуперация энергии, возобновляемые источники энергии и улавливание углерода. Для полного решения энергетических проблем, стоящих перед горнодобывающей отраслью, потребуется сочетание экологически чистых энергетических технологий.

Горнодобывающая промышленность имеет хорошие возможности для достижения целей обезуглероживания. Компании часто владеют большими участками земли, которые идеально подходят для реализации крупномасштабных проектов по возобновляемым источникам энергии для добычи полезных ископаемых и во многих случаях – для обеспечения электроэнергией своих местных сообществ.

Таким образом, декарбонизация горной промышленности России – это не попытка угодить мировому сообществу, а осознанное решение, принятое с учетом национальных интересов.

#### Благодарность

Исследование подготовлено в соответствии с государственным заданием ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» № 0833-2020-0008 «Разработка и эколого-экономическое обоснование технологии рекультивации нарушенных горно-металлургическим комплексом земель на основе мелиорантов и удобрений нового типа» и выполнено совместно с сотрудниками Центра коллективного пользования (ЦКП) с использованием фондов Центра коллективного пользования научным оборудованием ФНЦ БСТ РАН (№. Росс RU.0001.21 ПФ59, Единый российский реестр центров коллективного пользования – <http://www.ckp-rf.ru/ckp/77384>).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Azadi M., Edraki M., Farhang F., Ahn J. Opportunities for Mineral Carbonation in Australia's Mining Industry // Sustainability. 2019. Vol. 11. No. 5. P. 1250–1271. <https://doi.org/10.3390/su11051250>

2. Bandelow N. C., Hornung J., Schröder I., Vogeler C. S. Decarbonization and climate change // RPR Journal. 2021. Vol. 38. No. 6. P. 754–756. <https://doi.org/10.1111/ropr.12445>
3. Бергфельдт Т., Брок С. Сокращение углеродного следа в горнодобывающей и металлургической отрасли: как разработать стратегию и дорожную карту декарбонизации // Золото и технологии. 2021. № 2 (52). С. 100–104.
4. Кайсина В. В., Кустикова М. А. Анализ технологических решений в условиях перехода промышленности к декарбонизации производства // Московский экономический журнал. 2022. Т. 7. № 2. С. 429–441. [https://doi.org/10.55186/2413046X\\_2022\\_7\\_2\\_76](https://doi.org/10.55186/2413046X_2022_7_2_76)
5. Otto I. M., Donges J. F., Cremades R., Bhowmik A., Hewitt R. J., Lucht W., Rockström J., Allerberger F., McCaffrey M., Doe S. S. P., Lenferna A., Morán N., van Vuuren D. P., Schellnhuber H. J. Social tipping dynamics for stabilizing Earth's climate by 2050 // PNAS. 2020. Vol. 117. No. 5. P. 2354–2365. <https://doi.org/10.1073/pnas.1900577117>
6. Лебедева М. А. Проблемы декарбонизации экономики России // Проблемы развития территории. 2022. Т. 26. № 2. С. 57–72. <https://doi.org/10.15838/ptd.2022.2.118.5>
7. Igogo T., Lowder T., Engel-Cox J., Newman A., Awuah-Offei K. Integrating clean energy in mining operations: opportunities, challenges, and enabling approaches: Technical Report NREL/TP-6A50-76156. Golden, CO, USA, 2020. 43 p.
8. Martins F. F., Castro H. Raw material depletion and scenario assessment in European Union – A circular economy approach // Energy Reports. 2020. Vol. 6, Supplement 1. P. 417–422. <https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2019.08.082>
9. Ponomarenko T., Nevskaya M., Jonek-Kowalska I. Mineral Resource Depletion Assessment: Alternatives, Problems, Results // Sustainability. 2021. Vol. 13. No. 2. P. 862–877. <https://doi.org/10.3390/su13020862>
10. Плакиткин Ю. А., Плакиткина Л. С. Пять базовых закономерностей глобальной энергетики, «Зеленая сделка» как сдерживающие факторы развития горнодобывающих отраслей ТЭК // Горная промышленность. 2021. № 4. С. 94–100. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-4-94-100>
11. Immink H., Louw R. T., Brent A. C. Tracking decarbonisation in the mining sector // Journal of Energy in Southern Africa. 2018. Vol. 29. No. 1. P. 14–23. <https://doi.org/10.17159/2413-3051/2018/v29i1a3437>
12. Cox B., Innis S., Kunz N. C., Steen J. The mining industry as a net beneficiary of a global tax on carbon emissions // Communications Earth and Environment. 2022. Vol. 3. No. 1. P. 1–8. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00346-4>
13. Тарасов П. И., Хазин М. Л., Голубев О. В. Снижение геоэкологической нагрузки горноперерабатывающей промышленности северных и арктических территорий // ГИАБ. 2019. № 7. С. 74–82. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-07-0-74-82>
14. Болтыров В. Б., Стороженко Л. А., Сапсай М. А. Накопленный экологический вред территорий размещения горнопромышленных отходов прошлых лет // ГИАБ. 2021. № 5-2. С. 202–217. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_52\\_0\\_202](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_52_0_202)
15. Закондырин А. Е. Наилучшие доступные технологии в горнодобывающем секторе: актуальные проблемы и пути их решения // ГИАБ. 2020. № 6-1. С. 55–64. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-61-0-55-64>
16. Boldy R., Santini T., Annandale M., Erskine P. D., Sontel L. J. Understanding the impacts of mining on ecosystem services through a systematic review // The Extractive Industries and Society. 2021. Vol. 8. No. 1. P. 457–466. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.12.005>
17. Pablo-Romero M. P., Sánchez-Braza A., Romero M. G.-P. Renewable energy in Latin America // AIMS Energy. 2022. Vol. 10. No. 4. P. 695–717. <https://doi.org/10.3934/energy.2022033>
18. Fitch-Roy O., Benson D., Monciardini D. All around the world: Assessing optimality in comparative circular economy policy packages // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 286. Article number 125493. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125493>
19. Tayebi-Khorami M., Edraki M., Corder G., Golev A. Re-Thinking Mining Waste through an Integrative Approach Led by Circular Economy Aspirations // Minerals. 2019. Vol. 9. No. 5. P. 1–13. <https://doi.org/10.3390/min9050286>
20. Jones P. The Circular Economy, Resilience, and Digital Technology Deployment in the Mining and Mineral Industry // International Journal of Circular Economy and Waste Management (IJCEWM). 2021. Vol. 1. No. 1. P. 16–32. <https://doi.org/10.4018/IJCEWM.2021010102>
21. Плакиткина Л. С., Плакиткин Ю. А., Дьяченко К. И. Декарбонизация экономики как фактор воздействия на развитие угольной промышленности мира и России // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021. Т. 77. № 8. С. 902–912. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-8-902-912>
22. Сафонов Г. В. Декарбонизация мировой экономики и Россия // Нефтегазовая вертикаль. 2020. № 21-22. С. 66–70.
23. Fawzy S., Osman A. I., Doran J., Rooney D. W. Strategies for mitigation of climate change: a review // Environmental Chemistry Letters. 2020. Vol. 18. P. 2069–2094. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01059-w>
24. Жариков М. В. Цена декарбонизации мировой экономики // Экономика. Налоги. Право. 2021. Vol. 14. № 4. С. 40–47. <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2021-14-4-40-47>
25. Pocard N. How Proven Fuel Cell Technology Is Decarbonizing Mining and Construction. 2021. URL: <https://blog.ballard.com/decarbonizing-mining-and-construction>
26. Joshi S., Dahodwala M., Ahuja N., Dhanraj F., Koehler E., Franke M., Tomazic D. Evaluation of Hybrid, Electric and Fuel Cell Powertrain Solutions for Class 6-7 Medium Heavy-Duty Vehicles // SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility. 2021. Vol. 3. No. 6. P. 2955–2971. <https://doi.org/10.4271/2021-01-0723>
27. Cruzat J. V., Valenzuela M. A. Modeling and evaluation of benefits of trolley assist system for mining trucks // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. Vol. 54. No. 4. P. 3971–3981. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2823261>
28. Шешко О. Е. Сравнительная оценка природоёмкости карьерных автосамосвалов и дизель-троллейбусов // ГИАБ. 2018. № 6. С. 119–125. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-6-0-119-125>
29. Хазин М. Л., Апакашев Р. А. Карьерные самосвалы на водородном топливе // ГИАБ. 2022. № 1. С. 47–59. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_1\\_0\\_47](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_1_0_47)
30. Guerra C. F., Reyes-Bozo L., Vyhmeister E., Caparrós M. J., Salazar J. L., Godoy-Faúndez A., Clemente-Jul C., Verastegui-Rayó D. Viability analysis of underground mining machinery using green hydrogen as a fuel // International Journal of Hydrogen Energy. 2020. Vol. 45. No. 8. P. 5112–5121. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.250>
31. Ortega A., Gkoumas K., Tsakalidis A., Pekár F. Low-Emission Alternative Energy for Transport in the EU: State of Play of Research and Innovation // Energies. 2021. Vol. 14. P. 7764–7786. <https://doi.org/10.3390/en14227764>
32. Хазин М. Л. Перевод карьерных самосвалов на газ в условиях севера // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2019. Т. 19. № 1. С. 56–72. <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2019.1.5>
33. Kawalec W., Król R., Suchorab N. Regenerative Belt Conveyor versus Haul Truck-Based Transport: Polish Open-Pit Mines Facing Sustainable Development Challenges // Sustainability. 2020. Vol. 12. No. 21. P. 9215–9230. <https://doi.org/10.3390/su12219215>
34. Каленов О. Е. Цифровизация в горнодобывающей промышленности // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. 2021. № 5. С. 184–192. <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2021-5-184-192>
35. Мелешко Ю. В. Цифровизация предприятия горной промышленности как фактор обеспечения его экономической безопасности // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2020. № 3 (53). С. 59–63.
36. Ostovari H., Müller L., Mayer F., Bardow A. A climate-optimal supply chain for CO<sub>2</sub> capture, utilization, and storage by mineralization // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 360. Article number 131750. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131750>
37. Масанов А. Ю., Дубовичев М. А., Толстов А. В., Анисимова П. С., Гаранин К. В., Дорохов А. В., Барановская В. Б. Потенциал компенсации выбросов парниковых газов предприятий группы «АЛРОСА» за счет карбонизации отработанного кимберлита // Рациональное освоение недр. 2021. № 4 (60). С. 66–75. <https://doi.org/10.26121/RON.2021.87.40.008>

Статья поступила в редакцию 21 марта 2023 года



# Decarbonization of the Russia mining industry

Mark Leont'evich KHAZIN\*

Rafail Abdrakhmanovich APAKASHEV\*\*

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

## Abstract

**The purpose** and relevance of the work. Intensive industrial development, dependent on fossil fuels, has led to a critical accumulation of atmospheric carbon dioxide and an increase in the temperature of the Earth's surface. A further increase in the planet's temperature by 2 °C could lead to a rise in global sea level by 6 meters, which will cause an increase in the number of floods and hurricanes, and the melting of permafrost will pose a threat for polar cities infrastructure. All these factors will lead to significant losses, so the decision to decarbonize is in Russia's national interests. The purpose of the research is to find ways to reduce harmful emissions in the mining industry.

**Methodology.** Based on the reported data, a critical analysis and study of the possibilities of reducing greenhouse gas emissions in the process of mining is carried out.

**Results and scope.** The mining industry is the main source of raw materials for the manufacturing industry, transport, metallurgy, construction and energy. The decrease in the content of useful components in the ore makes it necessary to extract, load, transport and process more materials. In the short term, it is not possible to phase out fossil fuels, but the main methods of a mining company's decarbonization strategy can be considered: on-site power supply, reduction of diesel fuel consumption for rock transport, improved processing technology, carbon capture and storage.

For this, the mining industry can use various reserves in the form of environmentally friendly energy solutions, such as energy efficiency, energy recovery, renewable energy and carbon capture.

**Conclusions.** The mining industry can use various clean energy solutions such as energy efficiency, energy recovery, renewable energy and carbon capture. A complete solution to the energy challenges facing the mining industry will require a combination of clean energy technologies.

**Keywords:** decarbonization, climate, open pit mining, greenhouse gases, resource saving, ecology, economics, energy efficiency.

The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education in accordance with the state assignment for Ural State Mining University No. 0833-2020-0008, "Development and environmental and economic substantiation of the technology for reclamation of land disturbed by the mining and metallurgical complex based on reclamation materials and fertilizers of a new type". We obtained the scientific results with the staff of Center for the collective use by using the equipment of the Center for the collective use of scientific equipment of the Federal Scientific Center of biological systems and agricultural technologies of RAS (No. Ross RU.0001.21 PF59, the Unified Russian Register of Centers for Collective Use (<http://www.ckp-rf.ru/ckp/77384>)).

## REFERENCES

1. Azadi M., Edraki M., Farhang F., Ahn J. 2019, Opportunities for Mineral Carbonation in Australia's Mining Industry. *Sustainability*, vol. 11, no. 5, pp. 1250–1271. <https://doi.org/10.3390/su11051250>
2. Bandelow N. C., Hornung J., Schröder I., Vogeler C. S. 2021, Decarbonization and climate change. *RPR Journal*, vol. 38, no. 6, pp. 754–756. <https://doi.org/10.1111/ropr.12445>
3. Bergfeldt T., Brock S. 2021, Reducing the carbon footprint in the mining and metallurgical industry: how to develop a strategy and roadmap for decarbonization. *Zoloto i tekhnologii* [Gold and Technologies], no. 2 (52), pp. 100–104. (In Russ.)
4. Kaysina V. V., Kustikova M. A. 2022, Analysis of technological solutions in the context of the transition of industry to decarbonization of production. *Moskovskiy ekonomicheskii zhurnal* [Moscow Economic Journal], vol. 7, no. 2, pp. 429–441. (In Russ.) [https://doi.org/10.55186/2413046X\\_2022\\_7\\_2\\_76](https://doi.org/10.55186/2413046X_2022_7_2_76)
5. Otto I. M., Donges J. F., Cremades R., Bhowmik A., Hewitt R. J., Lucht W., Rockström J., Allerberger F., McCaffrey M., Doe S. S. P., Lenferna A., Morán N., van Vuuren D. P., Schellnhuber H. J. 2020, Social tipping dynamics for stabilizing Earth's climate by 2050. *PNAS*, vol. 117, no. 5, pp. 2354–2365. <https://doi.org/10.1073/pnas.1900577117>
6. Lebedeva M. A. 2022, Problems of decarbonization of the Russian economy. *Problemy razvitiya territorii* [Problems of territory development], vol. 26, no. 2, pp. 57–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.15838/ptd.2022.2.118.5>
7. Igogo T., Lowder T., Engel-Cox J., Newman A., Awuah-Offei K. 2020, Integrating clean energy in mining operations: opportunities, challenges, and enabling approaches: Technical Report NREL/TP-6A50-76156. Golden, CO, USA, 43 p.
8. Martins F. F., Castro H. 2020, Raw material depletion and scenario assessment in European Union – A circular economy approach. *Energy Reports*, vol. 6, Supplement 1, pp. 417–422. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.08.082>

✉ [Khasin@ursmu.ru](mailto:Khasin@ursmu.ru)

 <https://orcid.org/0000-0002-6081-4474>

\*\*[parknedra@yandex.com](mailto:parknedra@yandex.com)

 <https://orcid.org/0000-0002-9006-3667>



9. Ponomarenko T., Nevskaya M., Jonek-Kowalska I. 2021, Mineral Resource Depletion Assessment: Alternatives, Problems, Results. *Sustainability*, vol. 13, no. 2, pp. 862–877. <https://doi.org/10.3390/su13020862>
10. Plakitkin Yu. A., Plakitkina L. S. 2021, Five basic patterns of global energy, “Green Deal” as deterrents for the development of mining industries in the fuel and energy complex. *Gornaya promyshlennost'* [Mining Industry], no. 4, pp. 94–100. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-4-94-100>
11. Immink H., Louw R. T., Brent A. C. 2018, Tracking decarbonisation in the mining sector. *Journal of Energy in Southern Africa*, vol. 29, no. 1, pp. 14–23. <https://doi.org/10.17159/2413-3051/2018/v29i1a3437>
12. Cox B., Innis S., Kunz N.C., Steen J. 2022, The mining industry as a net beneficiary of a global tax on carbon emissions. *Communications Earth and Environment*, vol. 3, no. 17, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00346-4>
13. Tarasov P. I., Khazin M. L., Golubev O. V. 2019, Reducing the geoeological load of the mining and processing industry of the northern and arctic territories. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin], no. 7, pp. 74–82. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-07-0-74-82>
14. Boltzyrov V. B., Storozhenko L. A., Sapsay M. A. 2021, Accumulated environmental damage to the territories of disposal of mining wastes of the past years. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin], no. 5-2, pp. 202–217. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_52\\_0\\_202](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_52_0_202)
15. Zakondyrin A. E. 2020, Best Available Technologies in the Mining Sector: Actual Problems and Ways to Solve. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin], no. 6-1, pp. 55–64. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-61-0-55-64>
16. Boldy R., Santini T., Annandale M., Erskine P. D., Sonter L. J. 2021, Understanding the impacts of mining on ecosystem services through a systematic review. *The Extractive Industries and Society*, vol. 8, no. 1, pp. 457–466. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.12.005>
17. Pablo-Romero M. P., Sánchez-Braza A., Romero M. G.-P. 2022, Renewable energy in Latin America. *AIMS Energy*, vol. 10, no. 4, pp. 69–717. <https://doi.org/10.3934/energy.2022033>
18. Fitch-Roy O., Benson D., Monciardini D. 2021, All around the world: Assessing optimality in comparative circular economy policy packages. *Journal of Cleaner Production*, vol. 286, article number 125493. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125493>
19. Tayebi-Khorami M., Edraki M., Corder G., Golev A. 2019, Re-Thinking Mining Waste through an Integrative Approach Led by Circular Economy Aspirations. *Minerals*, vol. 9, no. 5, pp. 1–13. <https://doi.org/10.3390/min9050286>
20. Jones P. 2021, The Circular Economy, Resilience, and Digital Technology Deployment in the Mining and Mineral Industry. *International Journal of Circular Economy and Waste Management (IJCEWM)*, vol. 1, no. 1, pp. 16–32. <https://doi.org/10.4018/IJCEWM.2021010102>
21. Plakitkina L. S., Plakitkin Yu. A., Dyachenko K. I. 2021, Decarbonization of the economy as a factor influencing the development of the coal industry in the world and Russia. *Chernaya metallurgiya. Bulletin' nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information], vol. 77, no. 8, pp. 902–912. (In Russ.) <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-8-902-912>
22. Safonov G. V. 2020, Decarbonization of the world economy and Russia. *Neftegazovaya vertikal'* [Oil and gas vertical]. no. 21-22, pp. 66–70. (In Russ.)
23. Fawzy S., Osman A. I., Doran J., Rooney D. W. 2020, Strategies for mitigation of climate change: a review. *Environmental Chemistry Letters*, vol. 18, pp. 2069–2094. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01059-w>
24. Zharikov M. V. 2021, The price of decarbonization of the world economy. *Ekonomika. Nalogi. Pravo* [Economics, Taxes & Law], vol. 14, no. 4, pp. 40–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2021-14-4-40-47>
25. Pocard N. 2021, How Proven Fuel Cell Technology Is Decarbonizing Mining and Construction. URL: <https://blog.ballard.com/decarbonizing-mining-and-construction>
26. Joshi S., Dahodwala M., Ahuja N., Dhanraj F., Koehler E., Franke M., Tomazic D. 2021, Evaluation of Hybrid, Electric and Fuel Cell Powertrain Solutions for Class 6-7 Medium Heavy-Duty Vehicles. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*, vol. 3, no. 6, pp. 2955–2971. <https://doi.org/10.4271/2021-01-0723>
27. Cruzat J. V., Valenzuela M. A. 2018, Modeling and evaluation of benefits of trolley assist system for mining trucks. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 4, pp. 3971–3981. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2823261>
28. Sheshko O. E. 2018, Comparative assessment of the environmental intensity of mining dump trucks and diesel trolley carriers. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin], no. 6, pp. 119–125. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-6-0-119-125>
29. Khazin M. L., Apakashev R. A. 2022, Hydrogen-powered mining trucks. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin], no. 1, pp. 47–59. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_1\\_0\\_47](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_1_0_47)
30. Guerra C. F., Reyes-Bozo L., Vyhmeister E., Caparrós M. J., Salazar J. L., Godoy-Faúndez A., Clemente-Jul C., Verastegui-Rayó D. 2020, Viability analysis of underground mining machinery using green hydrogen as a fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 8, pp. 5112–5121. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.250>
31. Ortega A., Gkoumas K., Tsakalidis A., Pekár F. 2021, Low-Emission Alternative Energy for Transport in the EU: State of Play of Research and Innovation. *Energies*, vol. 14, pp. 7764–7786. <https://doi.org/10.3390/en14227764>
32. Khazin M. L. 2019, Transfer of quarry dumps to gas under the conditions of the north. *Vestnik PNIPU. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo* [Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering], vol. 19, no.1, pp. 56–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2019.1.5>
33. Kawalec W., Król R., Suchorab N. 2020, Regenerative Belt Conveyor versus Haul Truck-Based Transport: Polish Open-Pit Mines Facing Sustainable Development Challenges. *Sustainability*, vol. 12, no. 21, pp. 9215–9230. <https://doi.org/10.3390/su12219215>
34. Kalenov O. E. 2021, Digitalization in the mining industry. *Vestnik Rossiyskogo ekonomicheskogo universiteta imeni G. V. Plekhanova* [Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics], no. 5, pp. 184–192. (In Russ.) <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2021-5-184-192>
35. Meleshko Yu. V. 2020, Digitalization of a mining enterprise as a factor in ensuring its economic security. *Technico-technologicheskie problemy servisa* [Technical and technological problems of service], no. 3 (53), pp. 59–63. (In Russ.)
36. Ostovari H., Müller L., Mayer F., Bardow A. 2022, A climate-optimal supply chain for CO<sub>2</sub> capture, utilization, and storage by mineralization. *Journal of Cleaner Production*, vol. 360, article number 131750. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131750>
- Production. 2022. Vol. 360. Article number 131750. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131750>
37. Masanov A. Yu., Dubovich M. A., Tolstov A. V., Anisimova P. S., Garanin K. V., Dorokhov A. V., Baranovskaya V. B. 2021, “ALROSA” due to the carbonization of spent kimberlite. *Ratsional'noe osvoenie nedr* [Rational development of mineral resources], no. 4 (60), pp. 66–75. (In Russ.) <https://doi.org/10.26121/RON.2021.87.40.008>

The article was received on March 21, 2023