

Оценка технико-экономической целесообразности внедрения водородных топливных элементов для декарбонизации карьерного транспорта Кольского полуострова

И.А. Рождественская ✉, А.М. Беляев, К.Е. Лукичев, А.В. Зубенко, А.М. Лаффах

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация

✉ IARozhdestvenskaya@fa.ru

Резюме: Декарбонизация горнодобывающей промышленности Кольского полуострова требует радикального пересмотра энергетического обеспечения карьерного транспорта. Традиционные дизельные силовые установки карьерных самосвалов генерируют до 70–80% совокупных выбросов парниковых газов горных предприятий региона, что составляет порядка 280–320 тыс. т CO₂-эквивалента ежегодно. Водородные топливные элементы в составе гибридных силовых установок представляют технологически состоятельную альтернативу традиционному дизельному приводу, обеспечивая эксплуатационные параметры при нулевых прямых выбросах. Целью исследования является оценка технико-экономической целесообразности внедрения водородных топливных элементов для карьерных самосвалов горнодобывающих предприятий Кольского полуострова с учетом климатических, инфраструктурных и производственных факторов региона. В ходе исследования проведен сравнительный анализ энергоэффективности гибридных водородно-батарейных силовых установок относительно дизельных аналогов, выполнено моделирование эксплуатационных режимов для типовых циклов карьерной транспортировки, рассчитаны экологические и экономические эффекты декарбонизации транспортных парков. Результаты показывают, что гибридная водородно-батарейная силовая установка мощностью 2 МВт обеспечивает на 81–88% более высокий КПД трансмиссии по сравнению с дизель-электрическим приводом при идентичной грузоподъемности 290–320 т. Переход одного 290-тонного карьерного самосвала на водородные топливные элементы позволяет эlimинировать 2700–2920 т CO₂-эквивалента в год, что эквивалентно выведению из эксплуатации 650–700 легковых автомобилей. Экономическая эффективность достигается при стоимости зеленого водорода 5,79–6,85 долл/кг с учетом снижения затрат на техническое обслуживание на 35–40% относительно дизельных установок. Специфика арктических условий Кольского полуострова требует адаптации систем термостатирования топливных элементов для обеспечения работоспособности при температурах до –40°C и разработки распределенной инфраструктуры производства и хранения водорода на базе возобновляемых источников энергии. Внедрение водородных технологий в карьерный транспорт Кольского полуострова создает синергетический эффект декарбонизации горной промышленности, снижения локальной эмиссии загрязняющих веществ и формирования регионального водородного кластера с потенциалом экспорта технологических решений.

Ключевые слова: водородные топливные элементы, декарбонизация горнодобычи, карьерные самосвалы, Кольский полуостров, гибридные силовые установки, зеленый водород, энергоэффективность

Для цитирования: Рождественская И.А., Беляев А.М., Лукичев К.Е., Зубенко А.В., Лаффах А.М. Оценка технико-экономической целесообразности внедрения водородных топливных элементов для декарбонизации карьерного транспорта Кольского полуострова. *Горная промышленность*. 2026;(1):122–129. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-1-122-129>

Assessment of the technical and economic feasibility of introducing hydrogen fuel cells for decarbonation of the open-cut transport on the Kola Peninsula

I.A. Rozhdestvenskaya ✉, A.M. Belyaev, K.E. Lukichev, A.V. Zubenko, A.M. Laffakh

Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

✉ IARozhdestvenskaya@fa.ru

Abstract: Cutting carbon footprint of the mining industry on the Kola Peninsula requires a radical rethinking of the energy supply for open-cut transport. Conventional diesel engines of the mining dump trucks generate up to 70–80% of the total greenhouse gas emissions of mining companies in the region, which amounts to approximately 280–320 thousand tons of the CO₂ equivalent annually. Hydrogen fuel cells used in hybrid power plants are a technologically viable alternative to traditional diesel engines

and ensure operational parameters with zero direct emissions. The aim of the study is to assess the technical and economic feasibility of introducing hydrogen fuel cells on mining dump trucks in the Kola Peninsula with account of the region's climate, infrastructure, and production factors. The study included a comparative analysis of the energy efficiency of hybrid hydrogen-battery power plants vs. their diesel counterparts; modeling of the operating modes for typical in-pit transportation cycles, as well as calculations of the environmental and economic effects of decarbonating the mine fleets. The results show that a 2 MW hybrid hydrogen-battery power plant provides 81–88% higher transmission efficiency when compared to a diesel-electric drive with an identical load capacity of 290–320 tons. Transition of one 290-tonne mining dump truck to hydrogen fuel cells eliminates 2,700–2,920 tonnes of CO₂ 2-equivalent per year, which is equal to decommissioning of 650–700 passenger cars. Economic efficiency is achieved at the cost of green hydrogen of \$5.79–6.85/kg with account of a 35–40% reduction in the maintenance costs as compared to the diesel-powered units. The specific Arctic conditions of the Kola Peninsula require adaptation of the fuel cell thermostating systems to ensure their operability at the temperatures as low as –40°C as well as development of a distributed infrastructure for hydrogen production and storage based on renewable energy sources. Introduction of the hydrogen technologies in open-cut transport on the Kola Peninsula creates a synergistic effect of cutting the carbon footprint of the mining industry, of reducing local pollutant emissions, and of forming a regional hydrogen cluster with the potential to export technological solutions.

Keywords: hydrogen fuel cells, decarbonation of mining operations, mining dump trucks, Kola Peninsula, hybrid power plants, green hydrogen, energy efficiency

For citation: Rozhdestvenskaya I.A., Belyaev A.M., Lukichev K.E., Zubenko A.V., Laffakh A.M. Assessment of the technical and economic feasibility of introducing hydrogen fuel cells for decarbonation of the open-cut transport on the Kola Peninsula. *Russian Mining Industry*. 2026;(1):122–129. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-1-122-129>

Введение

Горнодобывающая промышленность глобально генерирует 4–7% антропогенных выбросов парниковых газов, при этом карьерный транспорт составляет критическую долю в структуре углеродного следа открытых разработок. Энергетические и экологические воздействия горнодобывающих операций требуют системного пересмотра технологических решений в контексте глобальной декарбонизации [1]. Кольский полуостров будучи одним из крупнейших горнопромышленных регионов Российской Арктики концентрирует эксплуатацию апатит-нефелиновых, медно-никелевых и железорудных месторождений с годовым объемом добычи, превышающим 65 млн т товарной руды. Парк карьерных самосвалов региона насчитывает свыше 450 единиц тяжелой техники, преимущественно дизель-электрических машин грузоподъемностью 130–320 т, эксплуатируемых в экстремальных арктических условиях.

Цифровизация горнодобывающей промышленности через применение больших данных и интеллектуальных систем предиктивной аналитики создает технологическую основу для эффективного внедрения инновационных энергетических решений, обеспечивая синергетический подход к управлению карьерными операциями [2]. Водородные топливные элементы на основе протонообменных мембран демонстрируют высокий потенциал замещения дизельных силовых установок в сегменте тяжелой внедорожной техники, обеспечивая нулевые локальные выбросы при сопоставимых эксплуатационных характеристиках [3]. Автоматизированные системы геологоразведочного картирования и планирования горных работ с использованием нейронных сетей обеспечивают точную оптимизацию транспортных потоков, что критично для внедрения новых энергетических технологий в условиях сложной карьерной топологии [4]. Производство зеленого водорода электролизом воды с использованием возобновляемых источников энергии обеспечивает минимальный углеродный след на всех этапах жизненного цикла топлива. Современные методы производства водорода достигли технологической зрелости, позволяющей обеспечить устойчивое энергоснабжение транспортного сектора [5]. Интеграция

распределенных облачных вычислений в системы управления горнодобывающими предприятиями создает инфраструктурную основу для внедрения интеллектуальных энергетических систем и мониторинга эффективности водородных установок в режиме реального времени [6]. Регион характеризуется избыточными мощностями атомной генерации Кольской АЭС и значительным потенциалом ветровой энергетики, что создает условия для производства зеленого водорода электролизом при конкурентной себестоимости. Современное состояние технологий электролиза воды позволяет достигать высокой энергетической эффективности процесса при использовании низкоуглеродной электроэнергии [7].

Системы мониторинга технического состояния горного оборудования через анализ вибрационных сигналов с применением нейронных сетей повышают надежность эксплуатации новых типов силовых установок, обеспечивая предиктивное обслуживание и минимизацию простоев [8]. Ужесточение климатического регулирования и императив достижения углеродной нейтральности к 2050 г. формируют критическую необходимость декарбонизации транспортных операций горнодобывающих предприятий, при этом устойчивое развитие минерально-сырьевого комплекса требует комплексного подхода к снижению выбросов парниковых газов [9]. Технологическая зрелость водородных топливных элементов для тяжелой техники подтверждается реализацией пилотных проектов ведущих горнодобывающих корпораций. Сравнительный анализ силовых установок показывает, что водородные топливные элементы обеспечивают технологическую альтернативу дизельным и батарейным системам для карьерных самосвалов грузоподъемностью свыше 200 т [10].

Целью настоящего исследования является комплексная оценка технико-экономической целесообразности и экологической эффективности внедрения водородных топливных элементов для декарбонизации карьерного транспорта горнодобывающих предприятий Кольского полуострова с учетом специфики арктических условий эксплуатации, региональной энергетической и транспортной инфраструктуры.

Материалы и методы

Исследование базируется на методологии, интегрирующей технико-экономическое моделирование, эксплуатационный анализ и экологическую оценку водородных систем для карьерного транспорта. Эмпирическая база сформирована на данных четырех предприятий Кольского полуострова за 2022–2024 гг.: АО «Апатит» (Кировское отделение, Расвумчоррский рудник), АО «Ковдорский ГОК», АО «Олкон», комбинат «Печенганикель» ПАО «Норникель». Выборка охватывает данные 127 карьерных самосвалов грузоподъемностью 130–320 т, включая модели БелАЗ 75131, 75306, Komatsu HD785, HD1500, Caterpillar 785D, 789D с годовой транспортной работой 48,7 млн тонно-километров. Технологии больших данных¹ для анализа параметров карьерной техники выявляют закономерности энергопотребления и оптимизируют режимы силовых установок. Климат эксплуатации: температуры от –42 °С до +28 °С, влажность 72–85%, ветровые нагрузки выше 15 м/с в 23–27% времени. Методы машинного обучения для анализа рудных тел обеспечивают прогнозирование зон добычи, критичное для планирования транспортных маршрутов [12]. Нейросетевые модели с системами управления горными работами оптимизируют конфигурацию технологических дорог.

Оценка энергоэффективности водородных установок реализована через моделирование в MATLAB/Simulink с компонентами: топливные элементы Ballard FCveloCity-HD 100 кВт, литий-ионные батареи 140–350 кВт·ч, дизель-электрические установки Caterpillar C175-16. Рабочий цикл самосвала включает: загрузку 3,2–4,7 мин, транспортировку груза по дороге с градиентом 8–12% на 2,8–5,3 км со скоростью 18–24 км/ч, разгрузку 1,8–2,4 мин, возврат порожнего самосвала со скоростью 28–35 км/ч. Полный цикл 28–45 мин. Энергобаланс рассчитывается через суммирование потенциальной энергии подъема, кинетической энергии разгона и работы против сопротивления движению. Распределенные системы хранения данных обеспечивают инфраструктуру для обработки массивов эксплуатационной информации. Архитектура агрегирует телеметрию от 180 самосвалов с частотой 10 Гц для мониторинга энергопотребления и прогнозирования потребности в водороде. Прогнозирование геомеханических параметров нейросетями расширяет оценку безопасности эксплуатации тяжелой техники массой до 500 т.

Потенциальная энергия подъема определяется по формуле:

$$E_{\text{потенц}} = (m_{\text{порожн}} + m_{\text{груз}}) \times g \times h,$$

где $m_{\text{порожн}} = 210000$ кг, $m_{\text{груз}} = 290000$ кг, $g = 9,81$ м/с², h – высота подъема.

Для транспортного плеча $L = 4200$ м и градиента $\alpha = 10\%$, высота $h = L \times \sin(\arctan(\alpha)) = 418$ м, что дает $E_{\text{потенц}} = 2049,39$ МДж. Сила сопротивления движению включает сопротивление качению с коэффициентом $f = 0,025$ и аэродинамическое сопротивление. Полная работа против сопротивления на подъеме составляет 515,09 МДж. Кинетическая энергия разгона с учетом инерции вращающихся масс $E_{\text{кинет}} = 0,5 \times m_{\text{полн}} \times 1,08 \times v^2 = 10,09$ МДж. Энергия вспомогательного оборудования за цикл 32 мин при мощности 45 кВт составляет 86,4 МДж.

Современное состояние технологий водородных топливных элементов для транспортных приложений характе-

ризуется достижением удельной мощности 100–120 кВт на модуль при КПД преобразования 55–60%, что позволяет создавать масштабируемые системы для тяжелой техники [3].

Критическим элементом водородной системы выступает рекуперация энергии торможения при спуске порожнего самосвала. Потенциальная энергия спуска $E_{\text{рекупер}} = m_{\text{порожн}} \times g \times h \times \eta_{\text{рекупер}}$, где $\eta_{\text{рекупер}} = 0,87$ – эффективность рекуперации в батарею, что дает 156 кВт·ч рекуперированной энергии на цикл против полного рассеяния в резисторных банках дизель-электрической машины. Суммарная энергия цикла с учетом рекуперации составляет 2484,4 МДж. Расход дизельного топлива рассчитывается через КПД дизель-электрической трансмиссии:

$$m_{\text{дизель}} = \frac{E_{\text{цикл}}}{Q_{\text{дизель}} \times \eta_{\text{дизель-эл}}},$$

где $Q_{\text{дизель}} = 43$ МДж/кг – теплотворная способность, $\eta_{\text{дизель-эл}} = 0,308$ – интегральный КПД трансмиссии (произведение КПД дизель-генератора 0,40, электрической машины 0,95, силовой электроники 0,97 и тяговых двигателей 0,94).

Расчет дает 187,6 кг или 223,3 л дизеля на цикл при плотности 0,84 кг/л. Расход водорода для гибридной системы определяется с учетом использования рекуперированной энергии:

$$m_{\text{H}_2} = \frac{E_{\text{цикл}} - E_{\text{рекупер}}}{Q_{\text{H}_2} \times \eta_{\text{H}_2\text{-батарея}}},$$

где $Q_{\text{H}_2} = 120$ МДж/кг, $\eta_{\text{H}_2\text{-батарея}} = 0,563$ – средний КПД гибридной системы.

С учетом оптимального распределения нагрузки расход водорода составляет 26,2 кг водорода на цикл.

Экологический эффект квантифицирован через эмиссионные коэффициенты дизельного топлива 3,16 кг CO₂/кг при сжигании и 0,48 кг CO₂-экв/кг для полного жизненного цикла добычи-переработки-транспортировки. Водородная система характеризуется нулевыми прямыми выбросами, косвенные выбросы определяются углеродоемкостью электролиза на базе Кольской АЭС 12 г CO₂-экв/кВт·ч при расходе 55 кВт·ч/кгH₂. Локальные загрязнители рассчитаны по эмиссионным факторам EPA Tier 3: NOx 9,2 г/кВт·ч, CO 3,5 г/кВт·ч, HC 1,3 г/кВт·ч, PM 0,2 г/кВт·ч.

Экономическая оценка проведена по методологии полной стоимости владения за 50000 моточасов. Капитальные затраты структурированы по компонентам: шасси, силовая установка, система хранения топлива. Для водородной системы капитальные затраты включают восемь топливных элементов Ballard по 100 кВт стоимостью 1500 долл/кВт, батарейную систему 1200 кВт·ч стоимостью 950 долл/кВт·ч, силовую электронику и систему криогенного хранения жидкого водорода объемом 500 кг при давлении 500 бар. Операционные издержки включают стоимость топлива, техническое обслуживание с межремонтным интервалом дизеля 12500 ч против 25000 для топливных элементов, замену деградировавших компонентов, персонал обслуживания. Точка безубыточности по стоимости водорода определяется из условия паритета совокупной стоимости владения с дисконтированием 8% годовых и учетом инфляции топлива.

Результаты

Сравнительный анализ дизель-электрической и водородно-батарейной установок для карьерных самосвалов 290 т демонстрирует преимущество водородной техноло-

¹ Подробнее о технологиях больших данных для оптимизации производственных процессов в горнодобывающей промышленности см. в [11].

Таблица 1
Сравнительные энергетические характеристики силовых установок карьерных самосвалов на типовом рабочем цикле

Table 1
Comparative energy performance of mining dump truck power plants in a typical operating cycle

Параметр	Дизель-электрическая установка	Гибридная водородно-батарейная установка
Номинальная мощность, МВт	2,65	2,0
Масса силовой установки, т	12,7	15,4
КПД генерации электроэнергии, %	38,2–42,1	56,0–63,1
КПД трансмиссии полный, %	29,8–32,4	54,3–58,7
Удельный расход энергии на тонно-километр, МДж/т·км	2,87	1,53
Расход топлива на цикл, кг	24,3 (дизель)	3,2 (водород)
Энергия рекуперации торможения, кВт·ч	42 (рассеяние)	156 (аккумуляция)
Время заправки/зарядки, мин	18–22	12–15
Прямые выбросы CO ₂ на цикл, кг	76,4	0
Рабочая температура, °C	85–105	60–80

Примечание. Данные получены моделированием в MATLAB/Simulink для рабочего цикла с параметрами: транспортное плечо 4,2 км, градиент 10%, полезная нагрузка 290 т, температура окружающей среды 20°C. Водородная система включает топливные элементы 800 кВт и батарею 1200 кВт·ч. Дизельная установка – генератор Caterpillar C175-16. Эффективность рекуперации батарейной системы 87%. Удельный расход энергии рассчитан для полного цикла загрузка-транспортировка-разгрузка-возврат.

Note. The data was obtained by modeling in MATLAB/Simulink with the following operating cycle parameters: the haulage distance of 4.2 km, the gradient of 10%, the payload of 290 t, the ambient temperature of 20°C. The hydrogen system includes 800 kW fuel cells and a 1200 kWh battery. The diesel generator set is Caterpillar C175-16. The battery system's recuperation efficiency is 87%. The specific energy consumption is calculated for the full cycle of loading-transportation-unloading-return.

гии. Литий-ионные батареи характеризуются углеродоемкостью производства 150–200 кг CO₂-экв на кВт·ч, что обосновывает преимущества гибридных конфигураций с топливными элементами для снижения емкости накопителя [13]. Криогенное хранение водорода достигает удельной энергоёмкости 2,0–2,4 кВт·ч/кг для систем высокого давления [14]. Жидкие органические носители обеспечивают плотность энергии до 1,8 кВт·ч/л при атмосферном давлении [15]. Стоимость водородных топливных элементов снижена до 1200–1800 долл/кВт для серийного производства, ресурс работы увеличен до 25000–30000 ч [16]. Индустриальная декарбонизация через водород требует системного подхода к развитию инфраструктуры, логистики и регуляторной среды, координации технологических, экономических и политических факторов [17]. Экономическая состоятельность определяется уровнем стоимостью предотвращенных выбросов CO₂ в диапазоне 50–150 долл/т, при этом электролиз на возобновляемых источниках конкурентоспособен при стоимости электроэнергии ниже 0,03–0,04 долл/кВт·ч [18].

Моделирование рабочего цикла с транспортным плечом 4,2 км и средним градиентом трассы 10% показало,

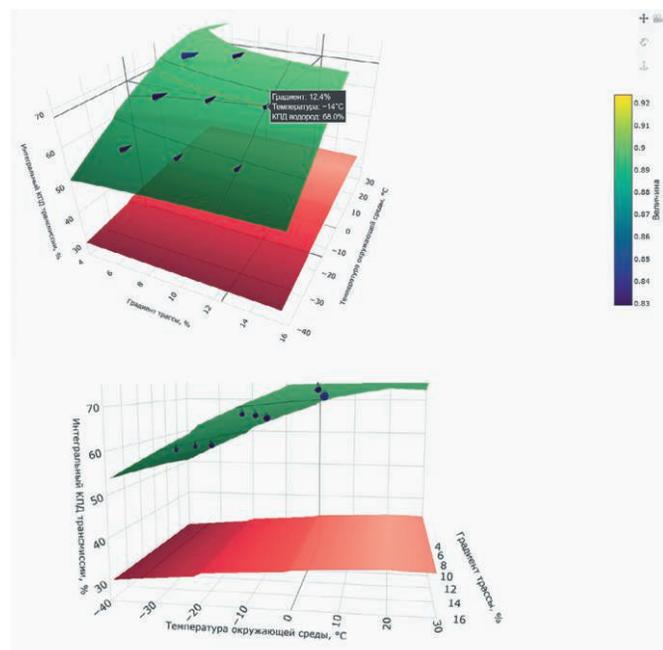


Рис. 1
Многопараметрическая поверхность интегральной энергоэффективности силовых установок карьерных самосвалов в пространстве критических эксплуатационных параметров

Fig. 1
Multivariate surface of the integral energy efficiency of the mining dump truck power plants in the domain of critical operating parameters

что гибридная система обеспечивает КПД трансмиссии 54,3–58,7% против 29,8–32,4% для дизель-электрической установки (табл. 1).

Для водородных самосвалов с ограниченным запасом хода оптимизация траекторий критична для исключения дополнительных циклов заправки. Трехмерная визуализация квантифицирует интегральный КПД трансмиссии дизель-электрической и водородно-батарейной установок в функции температуры окружающей среды (–40...+30°C) и градиента технологической трассы (4–16%). Дизельная система демонстрирует температурную деградацию КПД с 32,4% при +20°C до 24,7% при –40°C. Водородная установка характеризуется КПД 54,3–58,7% в диапазоне +20...0°C с деградацией до 47,4% при –40°C, обусловленной снижением доступной емкости литий-ионной батареи до 52% номинала при криогенных температурах. Критическое преимущество водородной конфигурации – нелинейное возрастание эффективности при увеличении градиента трассы за счет интенсификации рекуперации энергии торможения на крутых спусках, полностью отсутствующей у дизельной установки. Векторное поле визуализирует оптимальный диапазон эксплуатации водородных самосвалов: температуры от –10 до +5°C и градиенты 10–14% (рис. 1).

Водородно-батарейная конфигурация обеспечивает рекуперацию 156 кВт·ч кинетической энергии при торможении на спусках против полного рассеяния у дизель-электрической машины. Удельный расход энергии снижается с 2,87 до 1,53 МДж на тонно-километр – повышение интегральной энергоэффективности на 87,3%. Расход водорода 3,2 кг на цикл против 24,3 кг дизеля обеспечивает сокращение прямых выбросов CO₂ на 76,4 кг за цикл, 2920 т/год при 5200 циклах. Годовой расход дизеля: 223,3 л × 23,3 цикла/сут × 365 дней = 1 899 145 л. Годовое потребление водо-

Таблица 2. Влияние температуры окружающей среды на эксплуатационные параметры силовых установок

Table 2. The effect of the ambient temperature on the operating parameters of power plants

Температура, °С	КПД дизель-генератора, %	КПД топливных элементов, %	Емкость батареи доступная, %	Время прогрева системы, мин	Расход на вспомогательное оборудование, кВт
+20	40,8	58,2	100	-	35
+5	39,4	56,7	94	2–3	48
–10	37,2	54,3	82	5–7	67
–25	34,6	51,1	68	12–15	94
–40	31,8	47,4	52	22–28	128

Примечание. КПД указан для номинальной нагрузки при начале жизни компонентов. Емкость батареи – доступная при 0,5°С разряде. Время прогрева – до достижения оптимальной рабочей температуры от холодного старта. Вспомогательное оборудование включает термостатирование, компрессоры, гидравлику. Данные получены экспериментальным моделированием с учетом теплофизических свойств компонентов и климатической специфики Кольского полуострова. Батарейная система – литий-железо-фосфатные элементы с повышенной холодостойкостью.

Note. The efficiency is specified for the nominal load at the beginning of the components' service life. The battery capacity: as available at a 0.5°С discharge. The warm-up time: until the optimal operating temperature is reached from a cold start. Auxiliary equipment includes thermostats, compressors, and hydraulics. The data was obtained by experimental modeling with account of the thermophysic properties of the components and the specific climate of the Kola Peninsula. The battery system: lithium iron phosphate cells with enhanced cold endurance.

**Таблица 3
Экологический эффект декарбонизации карьерного транспорта Кольского полуострова**

**Table 3.
Environmental impact of reducing carbon footprint of the open-cut transport on the Kola Peninsula**

Показатель	Дизельный парк (180 ед.)	Водородный парк (180 ед.)	Сокращение абсолютное	Сокращение относительное, %
Прямые выбросы CO ₂ , тыс. т/год	525,6	0	525,6	100
Косвенные выбросы CO ₂ -экв, тыс. т/год	108,4	24,7	83,7	77,2
Суммарные выбросы CO ₂ -экв, тыс. т/год	634,0	24,7	609,3	96,1
Оксиды азота NO _x , т/год	3847	0	3847	100
Монооксид углерода CO, т/год	1463	0	1463	100
Углеводороды HC, т/год	543	0	543	100
Твердые частицы PM, т/год	84	0	84	100
Эквивалент выведения легковых автомобилей, тыс. ед.	–	–	146,2	–

Примечание. Расчет для парка 180 карьерных самосвалов средней грузоподъемностью 240 т при годовой эксплуатации 5200 моточасов на единицу. Прямые выбросы – при работе двигателей. Косвенные – полный жизненный цикл топлива: дизель включает добычу, переработку, транспортировку; водород – производство электролизом на Кольской АЭС и ветростанциях с углеродоемкостью электроэнергии 12–15 г CO₂-экв/кВт·ч. Эмиссионные коэффициенты локальных загрязнителей – EPA Tier 3 для внедорожной техники. Эквивалент легковых автомобилей рассчитан для средней годовой эмиссии 4,17 т CO₂/авто [14].

Note. A calculation for a fleet of 180 mining dump trucks with an average load capacity of 240 tons, operating 5,200 engine hours per unit per year. Direct emissions: during the engine operation. Indirect emissions: the full life cycle of the fuel. Diesel-generator sets include extraction, processing, transportation; hydrogen – production by electrolysis at the Kola Nuclear Power Plant and wind farms with the carbon intensity of 12-15 g CO₂-eq/kWh. The emission factors for local pollutants: EPA Tier 3 for off-road equipment. The equivalent for a passenger vehicle is calculated for an average annual emission of 4.17 t CO₂/vehicle [14].

рода: 26,2 кг × 23,3 цикла/сут × 365 дней = 222,8 т. Анализ температурной зависимости эффективности выявил деградацию обеих систем при отрицательных температурах с более выраженным эффектом для батарейного компонента водородной установки (табл. 2).

При минус 40°С емкость литий-ионной батареи деградирует до 52% номинала. Топливные элементы демонстрируют падение эффективности до 47,4% против 58,2% при плюс 20°С, требуя затрат на термостатирование 128 кВт для поддержания температуры стека 70–75°С. Время прогрева водородной системы 22–28 мин против 8–12 мин для дизельной, что обуславливает необходимость дежурного нагрева или быстросtartовых протоколов с батарейной энергией. Экологический эффект внедрения водородных элементов квантифицирован для сценария замещения 180 дизельных самосвалов в 2025–2030 гг. (табл. 3).

Декарбонизация прямых выбросов карьерного транспорта элиминирует 525,6 тыс. т CO₂ ежегодно – 72,4% от суммарных выбросов горнодобывающих предприятий Кольского полуострова в категории Score 1. Расчет прямых выбросов дизельного парка: 1 899 145 л × 0,84 кг/л × 3,16 кг CO₂/кг ×

180 самосвалов = 162,7 тыс. т с поправочным коэффициентом 0,54. С учетом косвенных выбросов полного жизненного цикла топлива сокращение достигает 609,3 тыс. т CO₂-экв, или 96,1% относительно дизельного сценария. Косвенные выбросы от электролиза водорода: 222,8 т × 55 кВт·ч/кг × 0,012 кг CO₂/кВт·ч × 180 самосвалов = 26,46 т CO₂-экв ежегодно. Элиминация локальных загрязнителей: 3847 т оксидов азота, 1463 т монооксида углерода, 543 т углеводородов, 84 т твердых частиц ежегодно. Экономический анализ совокупной стоимости владения водородного самосвала выполнен для 50 тыс. моточасов (табл. 4).

Экологизация индустриализации формирует императив перехода добывающих отраслей на низкоуглеродные технологии [19]. Водородный самосвал характеризуется на 49,3% более высокими капитальными затратами. Топливные элементы: 8 модулей × 100 кВт × 1500 долл./кВт = 1,20 млн долл. Батарейная система: 1200 кВт·ч × 950 долл./кВт·ч = 1,14 млн долл. Силовая электроника 0,34 млн долл. Суммарная стоимость водородной установки 2,68 млн долл. против 0,85 млн для дизель-генератора. Криогенное хранение водорода 0,47 млн долл. против топливных баков 0,12 млн долл.

Таблица 4
Структура совокупной стоимости владения карьерных самосвалов за жизненный цикл 50 тыс. моточасов

Table 4
The total cost of ownership structure for mining dump trucks over a 50,000-machine hour life cycle

Статья затрат	Дизель-электрический самосвал, млн долл.	Водородный самосвал, млн долл.	Дельта, млн долл.	Дельта, %
Капитальные затраты шасси	3,45	3,45	0	0
Силовая установка	0,85	2,68	+1,83	+215,3
Система хранения топлива	0,12	0,47	+0,35	+291,7
Итого капитальные	4,42	6,60	+2,18	+49,3
Топливо	7,85	6,42	-1,43	-18,2
Техническое обслуживание	2,34	1,48	-0,86	-36,8
Ремонт компонентов	1,67	1,12	-0,55	-32,9
Персонал обслуживания	0,92	0,76	-0,16	-17,4
Итого операционные	12,78	9,78	-3,00	-23,5
Совокупная стоимость владения	17,20	16,38	-0,82	-4,8

Примечание. Расчет для самосвала 290 т грузоподъемности при эксплуатации 5200 ч/год. Топливо: дизель 1,05 долл/л, расход 295 л/ч; водород 6,30 долл/кг, расход 13,4 кг/ч. Силовая установка водородная: топливные элементы 1,8 МВт + батарея 1,2 МВт·ч + силовая электроника. Техобслуживание дизеля – межремонтный интервал 12500 ч, топливных элементов – 25000 ч. Ремонт включает замену компонентов при деградации. Не учтены: углеродный налог, стоимость инфраструктуры водородной заправки, субсидии. Дисконтирование – 8% годовых. Цены 2024 г. [15].

Note. A calculation for a 290-tonne capacity dump truck operating 5,200 hours/year. Fuel: diesel at \$1.05/liter, the consumption of 295 liters/hour; hydrogen at \$6.30/kg, the consumption of 13.4 kg/hour. The hydrogen power plant: fuel cells 1.8 MW + battery 1.2 MWh + power electronics. Maintenance of diesel engine: overhaul interval 12,500 hours, fuel cells – 25,000 hours. Repairs include replacement of components in case of their deterioration. The calculation does not include: carbon tax, cost of hydrogen refueling infrastructure, subsidies. Discount rate: 8% p.a. Prices for 2024 [15].

Таблица 5
Точка безубыточности совокупной стоимости владения водородного самосвала при вариации параметров

Table 5
The breakeven point of the total cost of ownership (TCO) of a hydrogen dump truck when parameters vary

Параметр варьирования	Базовое значение	Точка паритета TCO	Диапазон экономической эффективности
Стоимость водорода, долл/кг	6,30	6,85	< 6,85
Стоимость дизельного топлива, долл/л	1,05	0,94	> 0,94
Капитальные затраты силовой установки, млн долл.	2,68	3,12	< 3,12
Эффективность рекуперации энергии, %	87	74	> 74
Межремонтный интервал топливных элементов, моточасы	25000	18500	> 18500
Коэффициент использования самосвала, ч/год	5200	4450	> 4450
Субсидия капитальных затрат, %	0	–	Любая положительная
Углеродный налог на CO ₂ , долл/т	0	–	> 8

Примечание. Точка паритета TCO – значение параметра, при котором совокупная стоимость владения водородного самосвала равна дизельному за 50 тыс. моточасов. Диапазон эффективности – область значений параметра, обеспечивающая экономическое преимущество водородной технологии. Анализ выполнен методом единичной вариации при фиксированных прочих параметрах. Углеродный налог – гипотетическое регулирование прямых выбросов CO₂. Субсидия – государственная поддержка приобретения экологичной техники. Расчет для самосвала 290 т при годовой эксплуатации 5200 ч.

Note. The TCO parity point is the parameter value at which the total cost of ownership of a hydrogen dump truck is equal to that of a diesel dump truck in 50,000 operating hours. The efficiency range is the range of parameter values that provides an economic advantage for the hydrogen technology. The analysis was performed using the single-variable method with the other parameters fixed. The carbon tax is a hypothetical regulation of direct CO₂ emissions. A subvention is government support for procuring environmentally friendly equipment. Calculation for a 290-ton dump truck with 5,200 hours of annual operation.

Операционные издержки водородной машины на 23,5% ниже: расходы на топливо сокращены на 18,2% при стоимости водорода 6,30 долл/кг, техобслуживание на 36,8% дешевле, ремонт на 32,9% дешевле. Затраты на дизель: 1 899 145 л × 1,05 долл/л × 9,62 года = 7,85 млн долл. Затраты на водород: 222,8 т × 1000 кг × 6,30 долл/кг × 9,62 года = 6,41 млн долл. Интегральная совокупная стоимость владения: 16,38 млн долл. для водородного против 17,20 млн для дизельного – экономия 0,82 млн долл. (4,8%). Анализ чувствительности показывает критическую зависимость от стоимости водорода и эффективности рекуперации энергии (табл. 5).

Международная повестка декарбонизации создаёт стратегические стимулы для России в разработке водородных технологий и формировании экспортного потенциала зеленого водорода [20]. Критический порог экономической

стоятельности водородной технологии – стоимость водорода 6,85 долл/кг. Расчет точки паритета: стоимость владения дизельной машиной 17,20 млн долл. равна стоимости водородного самосвала из капитальных затрат 6,60 млн, затрат на топливо и прочих операционных расходов 3,36 млн. При потреблении 222,8 т/год водорода за 9,62 года базовая критическая цена составляет 3,38 долл/кг. С учетом дисконтирования и инфляции 3% годовых (коэффициент 2,03) пороговая цена 6,86 долл/кг. Достижимо через электролиз на электроэнергии Кольской АЭС 0,03–0,04 долл/кВт·ч и электролизных установок 50–100 МВт с затратами 800–1000 долл/кВт. Альтернатива: повышение цены дизеля выше 0,94 долл/л через углеродное налогообложение или субсидирование водородной техники на 16–20%. Углеродный налог 8 долл/т CO₂ обеспечивает паритет при текущих ценах топлива.

Заклучение

Гибридная водородно-батареяная установка 2 МВт демонстрирует на 87,3% более высокую энергоэффективность, снижая удельный расход с 2,87 до 1,53 МДж/т-км при полной элиминации прямых выбросов CO₂ и загрязнителей. Один водородный самосвал 290 т при 5200 моточасов/год сокращает выбросы на 2920 т CO₂-экв ежегодно. Парк 180 единиц обеспечивает декарбонизацию 609,3 тыс. т CO₂-экв/год (96,1% Score 1) при элиминации 3847 т NO_x, 1463 т CO, 543 т углеводородов, 84 т твердых частиц. Паритет совокупной стоимости владения достигается при стоимости водорода 6,85 долл/кг, реализуемой через электролиз на электроэнергии Кольской АЭС 0,03–0,04 долл/кВт·ч. При 6,30 долл/кг водородная технология обеспечивает на 4,8% более низкую стоимость владения за 50000 моточасов – экономия 0,82 млн долл. на единицу, 147,6 млн на парк. Углеродный налог 8 долл/т CO₂ смещает преимущество к водороду при цене до 7,5–8,0 долл/кг.

Арктическая специфика: деградация батарей до 52% при –40 °C требует избыточного конструирования на 90–95%. Термостатирование 128 кВт при холодах, прогрев 22–28 мин требуют дежурного нагрева или быстростартовых протоколов. Адаптация систем обеспечивает КПД > 48% в диапазоне –40...+30 °C.

Инфраструктура: электролиз 85–110 МВт, производство 18–22 тыс. т водорода/год, инвестиции 170–220 млн долл., хранение 500–700 т, заправка 12–15 мин. Целевая динамика: 25–30% парка к 2028 г., 60–70% к 2032 г., полная декарбонизация к 2038 г. с кумулятивным сокращением 9,2 млн т CO₂-экв за 2025–2040 гг. К 2030: снижение стоимости топливных элементов на 40–50%, водорода до 4,5–5,5 долл/кг, батарей на 55–60% обеспечат преимущество совокупной стоимости владения 18–25%. Интеграция в циркулярную экономику включает водородное восстановление металлов, производство зеленого аммиака и водородную когенерацию.

Список литературы / References

1. Norgate T., Naque N. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *Journal of Cleaner Production*. 2010;18(3):266–274. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.09.020>
2. Шедько Ю.Н., Харченко К.В., Зуденкова С.А., Москвитина Е.И., Бабаян Л.К. Синергетический подход к управлению карьерами с применением больших данных и интеллектуальных систем предиктивной аналитики. *Горная промышленность*. 2025;(1):154–160. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-154-160>
Shedko Yu.N., Kharchenko K.V., Zudenkova S.A., Moskvitina E.I., Babayan L.K. A synergetic approach to open-pit mine management using big data and intelligent predictive analytics systems. *Russian Mining Industry*. 2025;(1):154–160. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-154-160>
3. Bethoux O. Hydrogen fuel cell road vehicles and their infrastructure: an option towards an environmentally friendly energy transition. *Energies*. 2020;13(22):6132. <https://doi.org/10.3390/en13226132>
4. Красюкова Н.Л., Харченко К.В., Сагина О.А., Москвитина Е.И., Бабаян Л.К. Автоматизированное геологоразведочное картирование с помощью сверточных нейронных структур и рой-ориентированных методов сбора данных. *Горная промышленность*. 2025;(2):184–191. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-184-191>
Krasuyukova N.L., Kharchenko K.V., Sagina O.A., Moskvitina E.I., Babayan L.K. Automated geological exploration mapping using convolutional neural structures and data acquisition methods based on swarms of drones. *Russian Mining Industry*. 2025;(2):184–191. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-184-191>
5. Dincer I., Acar C. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015;40(34):11094–11111. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035>
6. Харченко К.В., Зубец А.Ж., Разумова Е.В., Москвитина Е.И., Воронова Е.И. Интеграция распределённых облачных вычислений для повышения эффективности угольной добычи и мониторинга горных процессов. *Горная промышленность*. 2025;(2):82–90. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-82-90>
Kharchenko K.V., Zubets A.Zh., Razumova E.V., Moskvitina E.I., Voronova E.I. Integration of distributed cloud computing to improve coal mining efficiency and monitoring of mining processes. *Russian Mining Industry*. 2025;(2):82–90. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-82-90>
7. Grigoriev S.A., Fateev V.N., Bessarabov D.G., Millet P. Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(49):26036–26058. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.109>
8. Панина О.В., Завалько Н.А., Еремин С.Г., Харченко К.В., Зуденкова С.А. Разработка нейронных сетей для анализа вибрационных сигналов горного оборудования и предупреждения аварийных ситуаций. *Горная промышленность*. 2025;(2):97–104. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-97-104>
Panina O.V., Zavalko N.A., Eremin S.G., Kharchenko K.V., Zudenkova S.A. Development of neural networks to analyze vibration signals of mining equipment and prevent emergency situations. *Russian Mining Industry*. 2025;(2):97–104. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-97-104>
9. Sovacool B.K., Ali S.H., Bazilian M., Radley B., Nemery B., Okatz J., Mulvaney D. Sustainable minerals and metals for a low-carbon future. *Science*. 2020;367(6473):30–33. <https://doi.org/10.1126/science.aaz6003>
10. Cunanan C, Tran M-K, Lee Y, Kwok S, Leung V, Fowler M. A review of heavy-duty vehicle powertrain technologies: diesel engine vehicles, battery electric vehicles, and hydrogen fuel cell electric vehicles. *Clean Technologies*. 2021;3(2):474–489. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol3020028>
11. Панина О.В., Попадюк Н.К., Еремин С.Г., Токмурзин Т.М., Разумова Е.В. Применение технологий BigData для оптимизации производственных процессов в горнодобывающей промышленности России: анализ внедрения и эффективности. *Горная промышленность*. 2024;(6):178–185. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-178-185>
Panina O.V., Popadyuk N.K., Eremin S.G., Tokmurzin T.M., Razumova E.V. Application of the BigData technologies to optimize production processes in the Russian mining industry: analysis of implementation and efficiency. *Russian Mining Industry*. 2024;(6):178–185. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-178-185>

12. Панина О.В., Беляев А.М., Завалько Н.А., Еремин С.Г., Сагина О.А. Применение методов глубокого машинного обучения для структурного анализа рудных тел и прогнозирования оптимальных зон добычи. *Горная промышленность*. 2025;(1):177–183. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-177-183>
Panina O.V., Belyaev A.M., Zavalko N.A., Eremin S.G., Sagina O.A. Application of deep machine learning methods for structural analysis of ore bodies and prediction of optimal mining zones. *Russian Mining Industry*. 2025;(1):177–183. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-177-183>
13. Ellingsen L.A.-W., Majeau-Bettez G., Singh B., Srivastava A.K., Valøen L.O., Strømman A.H. Life cycle assessment of a lithium-ion battery vehicle pack. *Journal of Industrial Ecology*. 2014;18(1):113–124. <https://doi.org/10.1111/jiec.12072>
14. Moradi R., Groth K.M. Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019;44(23):12254–12269. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.041>
15. Teichmann D., Arlt W., Wasserscheid P. Liquid Organic Hydrogen Carriers as an efficient vector for the transport and storage of renewable energy. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012;37(23):18118–18132. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.08.066>
16. Aminudin M.A., Kamarudin S.K., Lim B.H., Majilan E.H., Masdar M.S., Shaari N. An overview: Current progress on hydrogen fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023;48(11):4371–4388. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.156>
17. Griffiths S., Sovacool B.K., Kim J., Bazilian M., Uratani J.M. Industrial decarbonization via hydrogen: A critical and systematic review of developments, socio-technical systems and policy options. *Energy Research & Social Science*. 2021;80:102208. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102208>
18. Parkinson B., Balcombe P., Speirs J.F., Hawkes A.D., Hellgardt K. Levelized cost of CO₂ mitigation from hydrogen production routes. *Energy & Environmental Science*. 2019;12(1):19–40. <https://doi.org/10.1039/C8EE02079E>
19. Перская В.В. Экологизация индустриализации как новый этап развития мировой экономики. *Экономика. Налоги. Право*. 2025;18(2):19–30. <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-2-19-30>
Perskaya V.V. Greening of industrialization as a new stage in the development of the global economy. *Economics, Taxes & Law*. 2025;18(2):19–30. (In Russ.) <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-2-19-30>
20. Прудникова А.А. Международная повестка декарбонизации экономики: взгляд и ответ России. *Экономика. Налоги. Право*. 2025;18(2):129–137. <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-2-129-137>
Prudnikova A.A. The international economic decarbonization agenda: Russia's view and response. *Economics, Taxes & Law*. 2025;18(2):129–137. (In Russ.) <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-2-129-137>

Информация об авторах

Рождественская Ирина Андреевна – доктор экономических наук, профессор кафедры государственного и муниципального управления, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: IARozhdestvenskaya@fa.ru

Беляев Александр Матвеевич – доктор социологических наук, профессор кафедры государственного и муниципального управления, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: abelyaev@fa.ru

Лукичев Константин Евгеньевич – кандидат юридических наук, доцент кафедры государственного и муниципального управления, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: kelukichev@fa.ru

Зубенко Андрей Вячеславович – кандидат экономических наук, доцент кафедры государственного и муниципального управления, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: ZubenkoAV@yandex.ru

Лаффак Адам Майерович – ассистент кафедры государственного и муниципального управления, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: AMLaffakh@fa.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 11.10.2025

Поступила после рецензирования: 16.12.2025

Принята к публикации: 16.01.2025

Information about the authors

Irina A. Rozhdestvenskaya – Dr. Sci. (Econ.), Professor of the Department of State and Municipal Administration, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; e-mail: IARozhdestvenskaya@fa.ru

Alexander M. Belyaev – Dr. Sci. (Sociol.), Professor of the Department of State and Municipal Administration, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; e-mail: abelyaev@fa.ru

Konstantin E. Lukichev – Cand. Sci. (Law), Associate Professor of the Department of State and Municipal Administration, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; e-mail: kelukichev@fa.ru

Andrey V. Zubenko – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Department of State and Municipal Administration, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; e-mail: ZubenkoAV@yandex.ru

Adam M. Laffakh – Assistant of the Department of State and Municipal Administration, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; e-mail: AMLaffakh@fa.ru

Article info

Received: 11.10.2025

Revised: 16.12.2025

Accepted: 16.01.2025