

# Моделирование экономических последствий перехода на электрифицированный парк техники при глубокой карьерной отработке месторождений

Л.Г. Чувахина ✉, П.И. Чувахин

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

✉ l-econom@mail.ru

**Резюме:** Переход горнодобывающей отрасли к электрифицированному парку карьерной техники определяет вектор трансформации операционной модели добывающих предприятий при отработке глубоких карьеров. Актуальность проблемы обусловлена необходимостью снижения удельных затрат на транспортирование горной массы в условиях нарастающей глубины разработки и одновременного достижения целей декарбонизации. Целью исследования является технико-экономическое моделирование последствий замены дизельного парка карьерных самосвалов грузоподъемностью 130–240 т электрифицированными аналогами (аккумуляторными и с системой троллейного токосъёма) на трёх глубоких карьерах: Лебединском ГОКе (глубина 450 м, железорудное сырьё), медном руднике Эскондида (глубина 645 м, Чили) и карьере Кевитса (глубина 525 м, Финляндия). Методология базируется на имитационном моделировании транспортных циклов, расчёте совокупной стоимости владения, дисконтированном анализе денежных потоков и оценке снижения выбросов CO<sub>2</sub> по методике Score 1. Эмпирическая база охватывает технические параметры самосвалов Caterpillar 793, Komatsu 930E, БелАЗ-75131, ценовые данные по дизельному топливу и электроэнергии за 2020–2025 гг., а также проектные характеристики литий-железо-фосфатных батарей ёмкостью 2200 кВт·ч. Результаты показали, что удельная стоимость энергоносителей при электрификации снижается на 58–65% в пересчёте на перемещённую тонну горной массы. Экономия совокупной стоимости владения за 10-летний горизонт составляет от 168 до 272 млн руб. на единицу техники в зависимости от глубины карьера и профиля транспортирования. Срок окупаемости дополнительных капитальных затрат варьируется в диапазоне 2,7–4,2 года. Внедрение троллейной системы на участках подъёма обеспечивает прирост скорости гружёного хода на 40–44% и сокращение расхода дизельного топлива на 59–85%. Практическая значимость результатов состоит в формировании обоснованной методической базы для проектирования программ электрификации горнотранспортного комплекса глубоких карьеров с количественной оценкой инвестиционных, эксплуатационных и экологических эффектов.

**Ключевые слова:** электрификация карьерного транспорта, глубокие карьеры, совокупная стоимость владения, аккумуляторные самосвалы, троллейная система, декарбонизация горнодобычи, имитационное моделирование

**Для цитирования:** Чувахина Л.Г., Чувахин П.И. Моделирование экономических последствий перехода на электрифицированный парк техники при глубокой карьерной отработке месторождений. *Горная промышленность*. 2026;(3):202–210. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-202-210>

## Modeling the economic effects of transition to an electrified fleet of equipment in deep open-pit mining

L.G. Chuvakhina ✉, P.I. Chuvakhin

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

✉ l-econom@mail.ru

**Abstract:** Transition of the mining industry to electric fleet in surface mining is defining a vector for transforming operating model for the mining companies operating deep open-pit mines. The relevance of this problem stems from the need to reduce the unit cost of transporting the rock mass from ever increasing mining depths while simultaneously achieving decarbonization goals. The objective of this study is to perform technical and economic modeling of the effects due to replacing the fleet of diesel-powered open-pit dump trucks with similar electric equipment (battery-powered and trolley systems) at the following three deep open-pit mines: the Lebedinsky Mining and Processing Plant (450 m deep, iron ore), the Escondida copper mine (645 m deep, Chile), and the Kevitsa open-pit mine (525 m deep, Finland). The methodology is based on simulation modeling of the haulage cycle, calculations of the total cost of ownership, analysis of the discounted cash flow, and assessment of the Scope 1 CO<sub>2</sub> emission reduction. The empirical base covers technical specifications of the Caterpillar 793, Komatsu 930E, and BelAZ-75131 dump trucks,

diesel fuel and electricity price data for 2020–2025, and the design parameters of 2,200 kWh lithium-iron phosphate batteries. The results showed that electrification reduced the specific energy cost by 58–65% per ton of the loaded rock. The total cost of ownership savings over a 10-year period ranges from 168 to 272 million RUB per unit of equipment, depending on the pit depth and the haulage profile. The payback period for additional capital expenditures ranges from 2.7 to 4.2 years. Implementation of the trolley system on the rises increases the loaded travel speed by 40–44% and reduces diesel fuel consumption by 59–85%. The practical significance of the results lies in formation of a sound methodological basis for designing programs for electrification of deep-pit mining and haulage systems, with a quantitative assessment of investment, operational, and environmental effects.

**Keywords:** electrification of in-pit transport, deep pits, total cost of ownership, battery-powered dump trucks, trolley system, decarbonization of mining, simulation modeling

**For citation:** Chuvakhina L.G., Chuvakhin P.I. Modeling the economic effects of transition to an electrified fleet of equipment in deep open-pit mining. *Russian Mining Industry*. 2026;(3):202–210. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-202-210>

## Введение

Интенсификация открытой разработки месторождений твёрдых полезных ископаемых сопровождается устойчивым ростом глубины карьерных выработок, что влечёт пропорциональное увеличение длины транспортных плеч и энергоёмкости перемещения горной массы. При глубине карьера свыше 400 м удельный расход дизельного топлива на тонну перемещённой породы возрастает на 35–50% по сравнению с горизонтами до 200 м, формируя доминирующую статью операционных затрат – до 30–40% себестоимости добычи [1]. На глобальном уровне горнодобывающий сектор генерирует 4–7 % антропогенных выбросов парниковых газов, причём карьерные самосвалы являются основным источником выбросов Scope 1 на открытых горных работах [2]. Переход к электрифицированным решениям – аккумуляторным карьерным самосвалам (BEV) и дизель-электрическим машинам с троллейным токосъёмом – рассматривается ведущими горнодобывающими компаниями как ключевой инструмент достижения целей по снижению углеродного следа к 2050 г.<sup>1</sup>

Экономическая привлекательность электрификации определяется фундаментальной разницей в стоимости энергоносителей: при цене дизельного топлива 68–96 руб./л энергозатраты самосвала грузоподъёмностью 150 т составляют около 8000 руб./ч, тогда как электрический аналог потребляет 275 кВт·ч/ч при стоимости электроэнергии 4,8–10,4 руб./кВт·ч, что соответствует 1320–2860 руб./ч [3]. Однако высокие капитальные затраты на приобретение BEV (336 млн руб. против 280 млн руб. за дизельный аналог класса 150 т), необходимость замены литий-железо-фосфатных батарей каждые 4–5 лет и инфраструктурные инвестиции в зарядные станции или троллейные линии создают неопределённость в оценке эффективности перехода [4]. Дополнительную сложность вносит зависимость результатов от горно-геологических условий: при увеличении глубины карьера возрастает энергоёмкость подъёма, что одновременно повышает потенциал экономии на топливе и увеличивает требования к ёмкости батарей [5]. Текущий уровень научной проработки проблемы характеризуется преобладанием исследований, выполненных на обобщённых (гипотетических) моделях карьеров без привязки к конкретным месторождениям. В работе [6] методом дискретно-событийного моделирования показано, что троллейная система позволяет сократить расход дизельного топлива на 59% и увеличить объём перемещения гор-

ной массы на 2,8% при одновременном уменьшении численности парка. Исследование [7] выявило возможность снижения выбросов CO<sub>2</sub> до 92,6% и операционных затрат на 40–62% при полной электрификации автопарка. Тем не менее остаётся открытым вопрос количественной верификации этих оценок применительно к реальным глубоким карьерам с различными горно-геологическими условиями и инфраструктурными ограничениями [8].

**Гипотеза:** переход на электрифицированный парк карьерных самосвалов при глубокой (более 400 м) отработке экономически целесообразен в горизонте 10 лет и обеспечивает снижение совокупной стоимости владения не менее чем на 20% по сравнению с дизельным сценарием при одновременном сокращении выбросов CO<sub>2</sub> на 60–90%.

**Цель исследования** – разработка и апробация технико-экономической модели перехода на электрифицированный парк техники для трёх глубоких карьеров с различными горно-геологическими условиями и количественная проверка сформулированной гипотезы.

## Материалы и методы

Методологическая основа исследования включает три взаимосвязанных блока: имитационное моделирование транспортных циклов карьерных самосвалов, расчёт совокупной стоимости владения (ТСО, от англ. *total cost of ownership*) и дисконтированный анализ денежных потоков. Имитационная модель воспроизводит полный транспортный цикл (погрузка – движение гружёного хода – разгрузка – движение порожнего хода) с учётом переменных параметров: уклон трассы (6–10%), длина плеча откатки (2,5–8,7 км), сопротивление движению (20–30 кг/т), скорость на подъёме (12–22 км/ч для дизельных и 17–35 км/ч для троллейных машин). Модель реализована в среде дискретно-событийного моделирования с шагом 1 мин и горизонтом прогнозирования 10 лет (2025–2035). Объектами моделирования выбраны три глубоких карьера, различающихся по типу полезного ископаемого, глубине, климатическим условиям и структуре парка техники: 1) карьер Лебединского ГОКа (Белгородская область, Россия) – глубина 450 м, размеры 5×3 км, добыча железистых кварцитов, объём годового перемещения горной массы 50 млн м<sup>3</sup>, парк 30 самосвалов БелАЗ-75131 (130 т) и Caterpillar 793 (240 т); 2) карьер Эскондида (пустыня Атакама, Чили) – глубина 645 м, высота над уровнем моря 3050 м, добыча медной руды, объём годового перемещения 400 млн т, парк 188 самосвалов Caterpillar 798AC (363 т) и Komatsu 980E (363 т); 3) карьер Кевитса (Финляндия) – глубина 525 м, добыча

<sup>1</sup> BHP Group. 2024 Chilean copper site tour: Escondida Presentation. Melbourne: BHP Group Ltd.; 2024. 48 p.

медно-никелевой руды, парк 28 самосвалов Komatsu 930E (290 т), наличие действующей троллейной линии протяжённостью 1,8 км.

Расчёт ТСО включает: капитальные затраты (CAPEX) на приобретение техники, стоимость батарей и их замены, инфраструктурные инвестиции (зарядные станции, троллейные линии), энергозатраты (дизельное топливо / электроэнергия), затраты на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР), фонд оплаты труда. Ставка дисконтирования – 10%, горизонт – 10 лет. Ценовые параметры: дизельное топливо 68 руб/л (базовый сценарий, Россия), 88 руб/л (Чили), 100 руб/л (Финляндия); электроэнергия 4,8 руб/кВт·ч (Россия), 7,2 руб/кВт·ч (Чили), 4,0 руб/кВт·ч (Финляндия). Стоимость LFP-батарей – 10 400 руб/кВт·ч с прогнозом снижения до 5600 руб./кВт·ч к 2030 г. Капитальные затраты на дизельный самосвал класса 150 т – 280 млн руб., на аккумуляторный аналог – 336 млн руб. Строительство 1 км троллейной линии – 224–280 млн руб. Стоимость зарядной станции мощностью 1 МВт – 64–96 млн руб. Все стоимостные показатели пересчитаны в рубли по курсу 80 руб/руб.

Эмпирическая база сформирована из открытых технических отчётов предприятий, каталожных данных производителей техники (Caterpillar, Komatsu, БелАЗ), ценовых мониторингов рынков дизельного топлива и электроэнергии за 2020–2025 гг., а также публикаций IDTechEx, BloombergNEF и SRK Consulting. Данные о расходе дизельного топлива верифицированы по фактическим показателям: 120 л/ч для самосвала 130 т и 300–400 л/ч для ультракласса (360 т). Потребление электроэнергии BEV – 275 кВт·ч/ч (класс 130–150 т) и 550–700 кВт·ч/ч (ультракласс). Статистическая обработка выполнена методом сценарного анализа (базовый, оптимистический, пессимистический) с расчётом NPV, IRR и дисконтированного срока окупаемости. Репрезентативность обеспечена охватом трёх геоклиматических зон и двух типов электрификации (BEV и троллейная система).

Оценка экологического эффекта выполнена по методике расчёта выбросов Score 1 с коэффициентом эмиссии 2,68 кг CO<sub>2</sub>/л дизельного топлива. Для электрической тяги учтена углеродоёмкость генерации электроэнергии: 0,05 кг CO<sub>2</sub>/кВт·ч (гидроэнергетика, Скандинавия), 0,35 кг CO<sub>2</sub>/кВт·ч (сетевой микс, Россия), 0,15 кг CO<sub>2</sub>/кВт·ч (возобновляемые источники, Чили). Энергопотребление карьерного самосвала на участке подъёма рассчитано на основе уравнения тягового баланса:

$$W = (m \times g \times \sin \alpha + m \times g \times f \times \cos \alpha + 0,5 \times \rho \times Cd \times S \times v^2) \times \frac{L}{\eta}$$

где  $W$  – энергия, затрачиваемая на один рейс гружёного хода, кДж;  $m$  – полная масса гружёного самосвала, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, 9,81 м/с<sup>2</sup>;  $\alpha$  – угол наклона трассы, рад;  $f$  – коэффициент сопротивления качению (0,025–0,040);  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup> (корректируется по высоте:  $\rho = \rho_0 \times \exp(-g \times h / (R_0 \times T_0))$ ), где  $\rho_0 = 1,225$  кг/м<sup>3</sup>,  $h$  – высота над уровнем моря,  $R_0 = 287$  Дж/(кг·К),  $T_0 = 288$  К);  $C_d$  – коэффициент аэродинамического сопротивления (0,7–0,9);  $S$  – площадь миделева сечения, м<sup>2</sup>;  $v$  – скорость движения, м/с;  $L$  – длина участка подъёма, м;  $\eta$  – КПД трансмиссии (0,82 для дизель-механической, 0,91 для электрической).

Удельный расход дизельного топлива пересчитан в энергетический эквивалент через теплотворную способность:

$$q = \frac{W}{Q_d \times \eta_e}$$

где  $q$  – расход топлива на рейс, л;  $Q_d$  – низшая теплотворная способность дизельного топлива, 35 800 кДж/л;  $\eta_e$  – эффективный КПД дизельного двигателя (0,38–0,42 на уровне моря; корректируется на высоту:  $\eta_e(h) = \eta_{e0} \times (1 - 0,035 \times h/1000)$  для  $h > 1500$  м).

ТСО за период  $T$  лет определена как дисконтированная сумма:

$$TCO = CAPEX^0 + \sum_{t=1..T} \left[ \frac{E_t + M_t + L_t}{(1+r)^t} \right] + \sum_{k=1} \left[ \frac{B_k}{(1+r)^{t_k}} \right]$$

где  $CAPEX^0$  – начальные капитальные затраты (техника + инфраструктура), руб.;  $E_t$  – затраты на энергоносители в году  $t$ , руб.;  $M_t$  – затраты на ТОиР в году  $t$ , руб.;  $L_t$  – фонд оплаты труда в году  $t$ , руб.;  $r$  – ставка дисконтирования (0,10);  $B_k$  – стоимость  $k$ -й замены батареи, руб.;  $t_k$  – год  $k$ -й замены.

Годовой объём потребления дизельного топлива парком определён как:

$$F = N \times R \times T \times D \times K_u$$

где  $F$  – годовой расход топлива, л/год;  $N$  – количество самосвалов в парке, ед.;  $R$  – часовой расход топлива на единицу, л/ч;  $T$  – продолжительность смены, ч;  $D$  – количество рабочих дней в году;  $K_u$  – коэффициент использования парка (0,85–0,92).

Производительность горнотранспортного комплекса рассчитана через число циклов:

$$P_{eff} = N \times K_u \times \frac{T \times n_s}{t_c} \times G \times K_g$$

где  $P_{eff}$  – суточная производительность, т/сут;  $n_s$  – количество смен в сутки;  $t_c$  – время полного цикла, ч;  $G$  – грузоподъёмность самосвала, т;  $K_g$  – коэффициент использования грузоподъёмности (0,92–0,98).

Время цикла включает компоненты:

$$t_c = t_{п} + \frac{L_{г}}{v_{г}} + t_{р} + \frac{L_{п}}{v_{п}} + t_{ож}$$

где  $t_{п}$  – время погрузки, ч;  $L_{г}$ ,  $L_{п}$  – длина гружёного и порожнего хода, км;  $v_{г}$ ,  $v_{п}$  – скорость гружёного и порожнего хода, км/ч;  $t_{р}$  – время разгрузки, ч;  $t_{ож}$  – время ожидания и маневрирования, ч.

Для BEV-сценария в тож включено время зарядки

$$\Delta t_3 = \frac{W_{ц} \times n_{ц}}{P_3 \times \eta_3}$$

где  $W_{ц}$  – энергия одного цикла, кВт·ч;  $n_{ц}$  – число циклов между зарядками;  $P_3$  – мощность зарядной станции, кВт;  $\eta_3$  – КПД зарядки (0,92–0,95).

Сокращение выбросов CO<sub>2</sub> рассчитано дифференцированно:

$$\Delta CO_2 = F \times \varepsilon_d - (E_{el} \times \varepsilon_g)$$

**Таблица 1**  
Технико-эксплуатационные параметры исследуемых карьеров

**Table 1**  
Technical and operational parameters of the investigated open-pit mines

Параметр	Лебединский ГОК	Эскондида	Кевитса
Глубина карьера, м*	450	645	525
Размеры в плане, кма	5 × 3	4,5 × 3	2,8 × 1,6
Годовой объём перемещения, млн т	105	400	42
Длина транспортного плеча, км**	3,8	8,7	5,2
Средний уклон, %	8	10	9
Количество самосвалов, ед.	30	188	28
Грузоподъёмность, т	130–240	218–363	290
Расход дизтоплива (парк), л/ч***	3 060	32 000	7 140
Время цикла (дизель), мин	32	58	44
Рабочих дней в году	340	350	330
Суточная наработка, ч	24	20	20
Коэффициент использования парка	0,85	0,85	0,85
Стоимость дизтоплива, руб/л	68	88	100
Стоимость электроэнергии, руб/кВт·ч	4,8	7,2	4,0****

Примечания: \* по состоянию на 2024–2025 гг.; \*\* включает полный путь от забоя до пункта разгрузки с учётом серпантинных участков; \*\*\* рассчитан с учётом коэффициента использования  $K_u = 0,85$  (например, для Лебединского ГОКа:  $30 \text{ ед.} \times 120 \text{ л/ч} \times 0,85 = 3060 \text{ л/ч}$ ); \*\*\*\* отражает преобладание гидроэнергетики в энергобалансе Финляндии.

Note. \* as of 2024–2025; \*\* includes the entire route from the face to the dumping point with account of the winding sections; \*\*\* calculated with account of the utilization coefficient  $K_u = 0,85$  (e.g., for the Lebedinsky Mining and Processing Plant:  $30 \text{ units} \times 120 \text{ l/h} \times 0,85 = 3,060 \text{ l/h}$ ); \*\*\*\* reflects the predominance of hydro-power in Finland's energy balance.

**Таблица 2**  
Удельные показатели энергоэффективности транспортирования по сценариям

**Table 2**  
Specific energy efficiency indicators of haulage by scenario

Параметр	Лебединский ГОК			Эскондида*			Кевитса		
	Дизель	BEV	Троллей	Дизель	BEV	Троллей	Дизель	BEV	Троллей
Часовой расход на 1 самосвал, л/ч или кВт·ч/ч	120 л	275 кВт·ч	85 кВт·ч**	200 л	550 кВт·ч	140 кВт·ч**	300 л	650 кВт·ч	180 кВт·ч**
Время цикла, мин	32	28	24	58	52	42	44	39	33
Удельный расход, л/т или кВт·ч/т	0,49	0,99	0,42	0,64	1,45	0,54	0,69	1,54	0,58
Удельная стоимость энергоносителя, руб/т	33,3	4,75	2,02	56,3	10,4	3,89	69,0	6,16	2,32
Снижение энергозатрат vs дизель, %	—	85,7	93,9	—	81,5	93,1	—	91,1	96,6
Скорость на подъёме гружёного, км/ч	12	17	22	11	15	20	13	18	25
Прирост производительности, %***	—	+12	+25	—	+10	+28	—	+11	+26

Примечания: \* учтён высотный коэффициент снижения мощности дизельного двигателя на 20% на отметке 3050 м; \*\* среднее за цикл с учётом подпитки от контактной сети на участке подъёма и работы от батареи / дизеля на горизонтальных участках; \*\*\* рассчитан как увеличение числа циклов в единицу времени.  
Note. \* accounts for a 20% altitude-related reduction in the diesel engine power at the elevation of 3,050 m; \*\* average per cycle, with account of power supply from the trolley line at the rises and operation using the battery/diesel engine on horizontal sections; \*\*\* calculated as an increase in the number of cycles per unit of time.

где  $\Delta CO_2$  – абсолютное снижение выбросов, т  $CO_2$ /год;  $F$  – сэкономленный объём дизтоплива, л/год;  $\epsilon_d$  – коэффициент эмиссии дизтоплива, 2,68 кг  $CO_2$ /л;  $E_{el}$  – годовое потребление электроэнергии замещающим парком, кВт·ч/год;  $\epsilon_g$  – углеродоёмкость генерации электроэнергии, кг  $CO_2$ /кВт·ч.

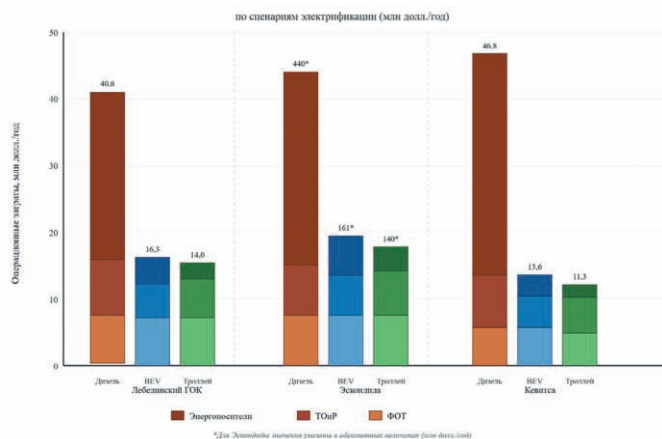
### Результаты

Моделирование транспортных циклов для трёх карьеров выполнено по единой методике с дифференциацией входных параметров, отражающих специфику каждого объекта (рис. 1). Базовые технико-эксплуатационные характеристики объектов сведены в табл. 1.

На основании параметров табл. 1 выполнен расчёт энергоёмкости транспортирования для трёх сценариев электрификации: А – полностью аккумуляторный самосвал (BEV); Б – дизель-электрический самосвал с троллейной системой на участках подъёма; В – гибридный вариант – BEV с троллейным токосъёмом. Результаты систематизированы в табл. 2.

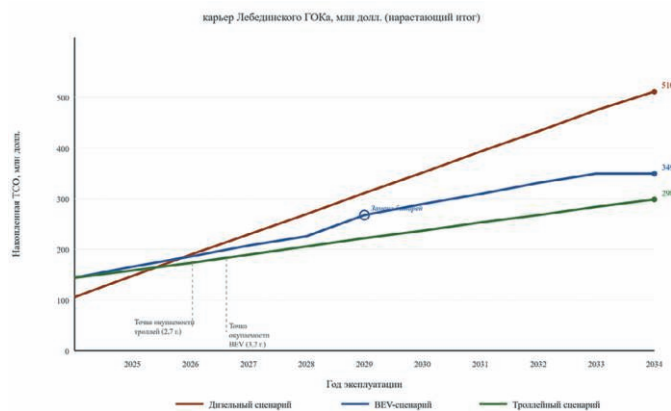
Расчёт удельного расхода: для Лебединского ГОКа при дизельном сценарии часовой расход одного самосвала класса 130 т – 120 л/ч, время цикла 32 мин (1,875 цикла/ч), удельный расход =  $120 / (130 \times 1,875) = 0,49 \text{ л/т}$ . При цене дизтоплива 68 руб/л удельная энергетическая составляющая = 33,3 руб/т. Для BEV: потребление 275 кВт·ч/ч, время цикла 28 мин (2,14 цикла/ч), удельное потребление =  $275 / (130 \times 2,14) = 0,99 \text{ кВт·ч/т}$ , энергетическая составляющая =  $0,99 \times 4,8 = 4,75 \text{ руб/т}$  – снижение на 85,7%.

Анализ данных табл. 2 демонстрирует, что снижение удельных энергозатрат наиболее значимо для Кевитсы (91,1–96,6%), что объясняется сочетанием низкой стоимости электроэнергии (4,0 руб/кВт·ч) и значительной глубины карьера. Для Эскондида высотное расположение (3050 м) снижает эффективность дизельных двигателей на 18–22%, что делает электрификацию особенно выгодной: удельные энергозатраты в дизельном сценарии максимальны (56,3 руб/т), а в троллейном – минимальны (3,89 руб/т). Лебединский ГОК демонстрирует промежуточные результаты, однако низкая стоимость электроэ-



**Рис. 1**  
Сравнительная структура операционных затрат на горнотранспортный комплекс по сценариям электрификации

**Fig. 1**  
A comparative breakdown of operating costs for the mining transport complex by different electrification scenarios



**Рис. 2**  
Динамика совокупной стоимости владения по годам эксплуатации для карьера Лебединского ГОКа

**Fig. 2**  
Changes in the total cost of ownership by year of operation for the Lebedinsky Open-Pit Mine

нергии в России компенсирует меньшую глубину карьера (рис. 3). Систематический обзор технологических трендов в управлении энергопотреблением горнотранспортных парков [9] подтверждает, что электрификация является доминирующей стратегией замещения дизельного топлива, а интеграция возобновляемых источников энергии с электрифицированным оборудованием [10] усиливает экономический эффект за счёт снижения стоимости энергоносителя.

Интегральная экономическая оценка выполнена путём расчёта TCO для каждого карьера и сценария на 10-лет-

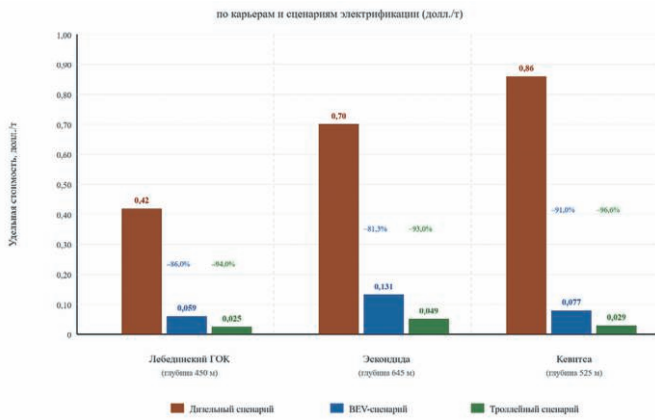
нем горизонте. Результаты представлены в табл. 3 (рис. 2). Годовой расход дизельного топлива рассчитан по формуле  $F = N \times R \times T_c \times D \times K_{ц}$ . Для Лебединского ГОКа:  $F = 30 \times 120 \times 24 \times 340 \times 0,85 = 24\,969\,600$  л/год  $\approx 25,0$  млн л/год. При цене 68 руб/л годовые затраты на топливо = 1700 млн руб. Для BEV-сценария: годовое потребление =  $30 \times 275 \times 24 \times 340 \times 0,85 = 57222\,000$  кВт·ч = 57,2 ГВт·ч; при 4,8 руб/кВт·ч затраты = 274,7 млн руб. Экономия на энергоносителях = 1 425 млн руб/год. Для Эскондида:  $F = 188 \times 200 \times 20 \times 350 \times 0,85 = 223720\,000$  л/год  $\approx 223,7$  млн л/год, затраты = 19686 млн руб/год. Данный объём согласуется с опублико-

**Таблица 3**  
Совокупная стоимость владения парком техники за 10 лет, млн руб.

**Table 3**  
The total cost of ownership of the vehicle fleet over 10 years, in million Russian Rubles.

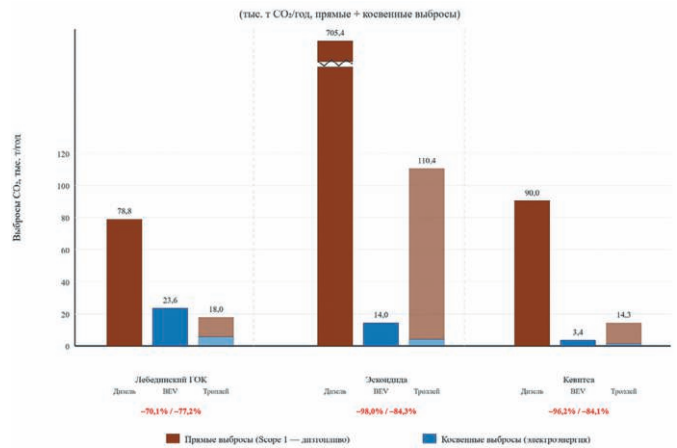
Параметр	Лебединский ГОК			Эскондида			Кевитса		
	Дизель	BEV	Троллей	Дизель	BEV	Троллей	Дизель	BEV	Троллей
CAPEX (техника)*	8 400	10 080	9 240	75 200	90 240	82 720	7 840	9 408	8 624
CAPEX (инфраструктура)	0	1 440	2 240**	0	8 960	14 000**	0	1 344	1 680**
Батареи (замена)***	0	3 432	0	0	21 510	0	0	3 200	0
Энергоносители (10 лет)	17 000	2 747	1 690	196 860	40 310	24 630	23 400	2 270	1 350
ТОиР (10 лет)****	6 720	4 032	4 624	60 160	36 096	41 392	6 272	3 763	4 320
Фонд оплаты труда	5 760	5 760	5 760	45 120	45 120	45 120	4 480	4 480	4 480
<b>Итого TCO</b>	<b>37 880</b>	<b>27 491</b>	<b>23 554</b>	<b>377 340</b>	<b>242 236</b>	<b>207 862</b>	<b>41 992</b>	<b>24 465</b>	<b>20 454</b>
Экономия vs дизель, %	—	27,4	37,8	—	35,8	44,9	—	41,7	51,3
Экономия на 1 самосвал, млн руб.	—	346,3	477,5	—	718,6	901,5	—	626,7	769,6
Дисконт. срок окупаемости, лет	—	3,4	2,9	—	3,1	3,9	—	2,6	2,3

Примечания: \* дизель 280 млн руб. для 130 т, 400 млн руб. для 360 т; BEV: +20 %; троллей: +10%; \*\* включают контактную сеть, тяговые подстанции и модернизацию самосвалов; \*\*\* ёмкость 2200 кВт·ч × 10 400 руб/кВт·ч = 22,88 млн руб. на единицу × 2 замены × N самосвалов (для ультракласса ёмкость 4000 кВт·ч), при троллейном сценарии бортовая батарея отсутствует (дизель-электрическая схема); \*\*\*\* для BEV снижены на 40% за счёт отсутствия ДВС.  
Note: \* diesel: 280 million rubles for 130 t, 400 million rubles for 360 t; BEV: +20%; trolley systems: +10%; \*\* includes overhead contact lines, traction substations and upgrade of dump trucks; \*\*\* the capacity of 2,200 kWh × 10,400 RUB/kWh = 22.88 million RUB per unit × 2 replacements × N dump trucks (for the ultra-class the capacity is 4000 kWh), in the trolley scenario no on-board battery is used (diesel-electric configuration); \*\*\*\* for BEVs, the costs are reduced by 40% due to the absence of a combustion engine.



**Рис. 3**  
Удельная стоимость перемещения 1 т горной массы по карьерам и сценариям

**Fig. 3**  
Specific cost of hauling 1 t of rock mass by open-pit mines and scenarios



**Рис. 4**  
Структура снижения выбросов CO<sub>2</sub> по источникам и сценариям электрификации

**Fig. 4**  
A breakdown of the CO<sub>2</sub> emission reduction by sources and electrification scenarios

ванными данными о порядка 350 млн л дизтоплива, подлежащих замещению на объектах Эскондида и Спенс совокупно.

Синергетический подход к управлению карьерами с применением интеллектуальных систем предиктивной аналитики [11] позволяет дополнительно оптимизировать диспетчеризацию электрифицированного парка, сокращая непроизводительные простои на 12–18%. Адаптивная оптимизация транспортных потоков на базе методов искусственного интеллекта [12] обеспечивает рациональное распределение самосвалов между забоями и зарядными

станциями, что критично для BEV-сценария с периодической подзарядкой. Результаты табл. 3 демонстрируют, что экономия ТСО за 10 лет составляет 27,4–51,3% в зависимости от карьера и сценария. Максимальная абсолютная экономия – на Эскондиде (169 478 млн руб. при троллейном сценарии), обусловленная масштабом парка (188 ед.) и высокой стоимостью дизтоплива. Максимальная относительная экономия – на Кевитсе (51,3% при троллее) благодаря минимальной стоимости электроэнергии. Дисконтированный срок окупаемости не превышает 3,9 года.

Экологическая оценка перехода к электрифицирован-

**Таблица 4**  
Экологические показатели электрификации горнотранспортного комплекса

**Table 4**  
Environmental indicators of electrification of the mining haulage fleet

Параметр	Лебединский ГОК			Эскондида			Кевитса		
	Дизель	BEV	Троллей	Дизель	BEV	Троллей	Дизель	BEV	Троллей
Годовой расход дизтоплива, млн л	25,0	0	3,75	223,7	0	33,6	28,6	0	4,3
Прямые выбросы CO <sub>2</sub> (Score 1), тыс. т/год*	67,0	0	10,1	599,5	0	90,0	76,6	0	11,5
Косвенные выбросы (электроэнергия), тыс. т/год**	0	20,0	5,3	0	11,9	3,8	0	2,9	0,8
Суммарные выбросы, тыс. т/год	67,0	20,0	15,4	599,5	11,9	93,8	76,6	2,9	12,3
Снижение суммарных выбросов, %	–	70,1	77,0	–	98,0	84,3	–	96,2	83,9
Углеродоёмкость генерации, кг CO <sub>2</sub> /кВт·ч	–	0,35	0,35	–	0,15	0,15	–	0,05	0,05
Стоимость квоты CO <sub>2</sub> (50 долл/т), млн руб/год	268	80	62	2 398	48	375	306	12	49
Потенциал углеродного кредита, млн руб/год***	–	188	206	–	2 350	2 023	–	294	257
Экономия на 1 самосвал, млн руб.	–	346,3	477,5	–	718,6	901,5	–	626,7	769,6
Дисконт. срок окупаемости, лет	–	3,4	2,9	–	3,1	3,9	–	2,6	2,3

Примечания: \* с коэффициентом 2,68 кг CO<sub>2</sub>/л дизтоплива; \*\* по углеродоёмкости генерации: 0,35 для России, 0,15 для Чили (100% возобновляемых источников ВНР с 2022 г.), 0,05 для Финляндии (гидро); \*\*\* при цене квоты 4000 руб/т CO<sub>2</sub> (50 долл. × 80), при текущих ценах углеродных квот в ЕС (~90 евро/т = 8000 руб/т) потенциал для Кевитсы возрастает до 530 млн руб/год.

Note: \* with the coefficient of 2.68 kg CO<sub>2</sub>/l of diesel fuel; \*\* based on the carbon intensity of power generation: 0.35 for the Russian Federation, 0.15 for Chile (100% renewable sources at BHP from 2022), 0.05 for Finland (hydropower); \*\*\* at a quota price of 4,000 RUB/t CO<sub>2</sub> (50 USD × 80), at the current EU carbon quota prices (~90 EUR/t = 8,000 RUB/t), the potential for the Kevitsa mine rises to 530 million RUB/year.

ному парку выполнена на основе расчёта выбросов CO<sub>2</sub>. Результаты сведены в табл. 4 (рис. 4).

Оценка эффективности внедрения замкнутых производственных циклов [13] подтверждает, что сокращение выбросов на уровне 70–98% достижимо при системном подходе к ресурсосбережению. Экологизация индустриализации<sup>2</sup> как мегатренд формирует макроэкономические условия, при которых углеродные кредиты становятся значимым фактором инвестиционной привлекательности. Совокупный ежегодный потенциал углеродных кредитов для трёх карьеров составляет 2832 млн руб. при цене квоты 4000 руб/т CO<sub>2</sub>, а при европейских ценах (~8000 руб/т) превышает 5100 млн руб/год.

Чувствительность результатов проверена сценарным анализом. При росте цены дизтоплива на 30% (до 88–130 руб/л) экономия ТСО увеличивается на 8–12 пп. При снижении стоимости батарей до 5600 руб/кВт·ч (прогноз на 2030 г.) CAPEX BEV-сценария сокращается на 9–11%, а дисконтированный срок окупаемости – до 1,8–2,5 лет. При увеличении стоимости электроэнергии на 50% экономия ТСО сохраняется на уровне 18–34%, что свидетельствует о робастности выводов. Анализ влияния автоматизированных систем управления горным производством показывает, что цифровизация диспетчеризации создаёт предпосылки для полностью автономной эксплуатации электрифицированного парка. Динамические модели управления транспортными ресурсами формируют математический аппарат для оптимизации маршрутов зарядки и расписаний работы троллейных линий. Финансовые меры государственной поддержки и риск-факторы инвестиционных проектов по внедрению инновационной техники способны сократить срок окупаемости до 1,5–2,0 лет при субсидировании 20–30% капитальных затрат<sup>3</sup>.

Опыт ВНР на Эскондиде (автономная эксплуатация 33 самосвалов Komatsu 980E на руднике Спенс с 2024 г.) показывает повышение топливной эффективности на 11% и увеличение срока службы шин на 35%.

### Обсуждение результатов

Полученные результаты подтверждают гипотезу исследования: переход на электрифицированный парк техники при глубокой карьерной отработке экономически целесообразен в 10-летнем горизонте и обеспечивает снижение ТСО на 27,4–51,3%, что превышает пороговое значение 20%. Снижение выбросов CO<sub>2</sub> составляет 70,1–98,0%, находясь в верхней части прогнозируемого диапазона 60–90%. Глубина карьера оказывает нелинейное воздействие на экономический эффект: при увеличении глубины с 450 м (Лебединский ГОК) до 645 м (Эскондида) абсолютная экономия на единицу техники возрастает в 2,1 раза (с 346,3 до 718,6 млн руб.), тогда как относительная экономия увеличивается с 27,4 до 35,8%. Это объясняется тем, что при большей глубине доля энергозатрат в структуре ТСО возрастает, а электрификация позволяет сократить именно эту доминирующую статью (см. рис. 1). Троллейная система демонстрирует преимущество перед полностью аккумуляторным сценарием по ТСО (на 9–14% ниже) при глубине карьера свыше 500 м, что обусловлено отсутствием затрат на замену батарей и более высокой скоростью на подъёме (+40–44% по сравнению с дизелем). Однако троллей предъ-

являет более жёсткие требования к стабильности геометрии борта карьера и конфигурации транспортных бERM, что ограничивает его применимость при интенсивной переконфигурации горизонтов. BEV-сценарий обеспечивает большую гибкость, но сопряжён с рисками деградации батарей при экстремальных температурах (от –40°C в Финляндии до +40°C в Атакаме). Практическая ценность результатов состоит в создании воспроизводимого методического инструментария для проектирования программ электрификации глубоких карьеров. Предложенная модель позволяет адаптировать расчёты к конкретным горно-геологическим и инфраструктурным условиям варьированием входных параметров (глубина, уклон, стоимость энергоносителей, размер парка). Перспективы дальнейших исследований связаны с интеграцией стохастических факторов (волатильность цен, технологические сбои), расширением выборки до 8–10 карьеров и включением эффектов автономной эксплуатации и предиктивной аналитики.

### Заключение

Технико-экономическое моделирование перехода на электрифицированный парк карьерных самосвалов, выполненное для трёх глубоких карьеров с глубиной 450–645 м, продемонстрировало устойчивую экономическую целесообразность электрификации горнотранспортного комплекса. Удельная стоимость энергоносителей при BEV-сценарии снижается на 81,5–91,1% (с 33,3–69,0 до 4,75–10,4 руб/т), при троллейном – на 93,1–96,6% (до 2,02–3,89 руб/т). Совокупная стоимость владения за 10 лет сокращается на 10389 млн руб. (Лебединский ГОК, BEV) до 169478 млн руб. (Эскондида, троллейная система). Дисконтированный срок окупаемости составляет 2,3–3,9 года.

Годовой расход дизельного топлива при BEV-сценарии полностью элиминируется, при троллейной системе сокращается на 85%: с 25,0 до 3,75 млн л/год на Лебединском ГОКе, с 223,7 до 33,6 млн л/год на Эскондиде, с 28,6 до 4,3 млн л/год на Кевитсе. Годовая экономия на энергоносителях составляет 1425 млн руб. (Лебединский ГОК, BEV), 156550 млн руб. (Эскондида, BEV) и 21130 млн руб. (Кевитса, BEV). Прямые выбросы CO<sub>2</sub> (Score 1) снижаются на 70,1–98,0%: абсолютное сокращение – 47,0 тыс. т/год для Лебединского ГОКа, 587,6 тыс. т/год для Эскондиды и 73,7 тыс. т/год для Кевитсы при BEV-сценарии. Совокупный потенциал углеродных кредитов для трёх объектов достигает 2832 млн руб/год при цене квоты 4000 руб/т CO<sub>2</sub>.

Скорость гружёного хода на подъёме при электрификации возрастает на 29–92%: с 11–13 км/ч (дизель) до 15–18 км/ч (BEV) и 20–25 км/ч (троллейная система). Это обеспечивает сокращение времени транспортного цикла на 11–25% и прирост производительности горнотранспортного комплекса на 10–28%. Затраты на ТОиР снижаются на 31–40% за счёт отсутствия двигателя внутреннего сгорания и упрощённой кинематической схемы трансмиссии. Экономия на одну единицу техники за 10-летний горизонт составляет от 346,3 млн руб. (Лебединский ГОК, BEV) до 901,5 млн руб. (Эскондида, троллей). Сравнительный анализ двух сценариев показал, что троллейная система обеспечивает более низкую ТСО при глубине свыше 500 м (экономия на 9,6–10,4 пп. по сравнению с BEV), но предъявляет повышенные требования к стабильности транспортных бERM. BEV-сценарий оптимален для карьеров с частой реконфигурацией горизонтов и глубиной до 500 м. Гибрид-

<sup>2</sup> Подробнее о экологизации индустриализации см. [14].

<sup>3</sup> Подробнее о влиянии автоматизированных систем управления горным производством, динамических моделях управления транспортными ресурсами, финансовых мерах государственной поддержки и риск-факторах инвестиционных проектов по внедрению инновационной техники см. [15–17].

ный вариант (BEV с динамической подзарядкой от троллея) – перспективное направление, объединяющее преимущества обоих подходов, но требующее верификации на промышленных объектах.

Робастность модели подтверждена: даже при увеличении стоимости электроэнергии на 50% экономия ТСО сохраняется на уровне 18–34%. Снижение стоимости LFP-батарей до 5 600 руб/кВт·ч (прогноз на 2030 г.) сокращает срок окупаемости BEV до 1,8–2,5 лет. Интеграция автономного

управления увеличивает производительность на 11–20%, предиктивная аналитика снижает внеплановые простои на 15–25%. При прогнозируемом ужесточении углеродного регулирования и продолжающемся удешевлении аккумуляторных технологий экономическое преимущество электрифицированных парков будет нарастать, формируя новый стандарт эффективности для глубокой карьерной обработки месторождений.

### Список литературы / References

1. Feng Y., Liu Q., Li Y., Yang J., Dong Z. Energy efficiency and CO<sub>2</sub> emission comparison of alternative powertrain solutions for mining haul truck using integrated design and control optimization. *Journal of Cleaner Production*. 2022;370:133568. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133568>
2. Aydogdu K., Duzgun S., Yaylaci E.D., Aranoglu F. A systems engineering approach to decarbonizing mining: analyzing electrification and CO<sub>2</sub> emission reduction scenarios for copper mining haulage systems. *Sustainability*. 2024;16(14):6232. <https://doi.org/10.3390/su16146232>
3. Виноградов А.Б., Гнездов Н.Е., Чистосердов В.Л., Коротков А.А. Модернизация электротрансмиссии карьерных самосвалов по результатам длительной эксплуатации. *Горный журнал*. 2022;(4):106–112. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.04.16>  
Vinogradov A.B., Gnezdov N.E., Chistoserdov V.L., Korotkov A.A. Modernization of electromechanical transmission for dump trucks based on long-term operation data. *Gornyi Zhurnal*. 2022;(4):106–112. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.04.16>
4. Jaswani P., Jeffs J. *Electric Vehicles in Mining 2024–2044: Technologies, Players, and Forecasts*. Cambridge: IDTechEx; 2024. 280 p.
5. Лель Ю.И., Глебов И.А., Ганиев Р.С., Иванова О.А. Систематизация условий эксплуатации карьерного автотранспорта по энергетическому критерию. *Проблемы недропользования*. 2017;(2):16–25. <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.02.016>  
Lel Yu.I., Glebov I.A., Ganiev R.S., Ivanova O.A. Systematization of operating conditions for open-pit motor transport according to energy criterion. *Problems of Subsoil Use*. 2017;(2):16–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.02.016>
6. Верхотуров Н.В., Овсейчук В.А. Разработка технологической схемы транспортирования горнорудной массы дизель-троллейвозами. *Горное оборудование и электромеханика*. 2023;(2):28–34. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2023-2-28-34>  
Verkhoturou N.V., Ovseychuk V.A. Development of a technological scheme for the transportation of rock mass by diesel trolley trucks. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2023;(2):28–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2023-2-28-34>
7. Tokac B., Zhang Q., Sari Y.A. Environmental and economic comparison of diesel and electric trucks in open-pit mining operations. *Journal of Cleaner Production*. 2025;507:145540. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145540>
8. Бирюков В.В., Малозёмов Б.В., Щуров Н.И., Сингизин И.И., Латышев Р.Н. Исследование энергоэффективности применения пневмоколесного транспорта с электроприводом при добыче ископаемых открытым способом. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(12-1):301–315. Режим доступа: [https://giab-online.ru/files/Data/2024/12/12-1\\_2024\\_301-315.pdf](https://giab-online.ru/files/Data/2024/12/12-1_2024_301-315.pdf) (дата обращения: 17.02.2026).  
Biryukov V.V., Malozyomov B.V., Shchurov N.I., Singizin I.I., Latyshev R.N. Energy efficiency of electric machines with pneumatic tires in open pit mineral mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(12-1):301–315. (In Russ.) Available at: [https://giab-online.ru/files/Data/2024/12/12-1\\_2024\\_301-315.pdf](https://giab-online.ru/files/Data/2024/12/12-1_2024_301-315.pdf) (accessed: 17.02.2026).
9. Mesa J.A., Hincapie-Florez D., Bobadilla-Vasquez M., Corredor L., Pupo-Roncillo O., Gonzalez-Quiroga A. Assessing technological trends in mining fleet energy management toward sustainable mineral extraction. *Resources Policy*. 2025;109:105714. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105714>
10. Kronja J., Galić I. Integration of renewable energy sources to achieve sustainability and resilience of mines in remote areas. *Mining*. 2025;5(3):51. <https://doi.org/10.3390/mining5030051>
11. 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>

12. Кадырова Г.М., Красюкова Н.Л., Рождественская И.А., Токмурзин Т.М., Воронова Е.И. Адаптивная оптимизация транспортных потоков внутри подземных выработок на базе методов искусственного интеллекта. *Горная промышленность*. 2025;(1):137–146. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-137-146>  
Kadyrova G.M., Krasuyukova N.L., Rozhdestvenskaya I.A., Tokmurzin T.M., Voronova E.I. Adaptive optimization of traffic flows in underground mine workings based on artificial intelligence methods. *Russian Mining Industry*. 2025;(1):137–146. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-137-146>
13. Кушель Е.С. Оценка эффективности внедрения замкнутых производственных циклов в промышленности России: влияние на снижение выбросов и ресурсосбережение. *Вопросы экологии*. 2024;37(1):185–214. Режим доступа: <https://grreview.ru/index.php/wej/article/view/183> (дата обращения: 21.02.2026).  
Kushel E.S. Assessment of the effectiveness of the introduction of closed production cycles in the Russian industry: impact on emission reduction and resource conservation. *Voprosy Ecologii*. 2024;37(1):185–214. (In Russ.) Available at: <https://grreview.ru/index.php/wej/article/view/183> (accessed: 21.02.2026).
14. 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>
15. Еремин С.Г., Капитанец Ю.В., Зубенко А.В., Бартошевич И.А., Кущёв Н.П. Анализ влияния внедрения автоматизированных систем управления горным производством на эффективность и безопасность работы горнодобывающих предприятий России. *Горная промышленность*. 2024;(5):101–107. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-101-107>  
Eremin S.G., Kapitanets Yu.V., Zubenko A.V., Bartoshevich I.A., Kushchev N.P. Analyzing the impact of introducing automated mining process control systems on the efficiency and safety of mining enterprises in Russia. *Russian Mining Industry*. 2024;(5):101–107. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-101-107>
16. Косоруков О.А., Мищенко А.В., Свиридова О.А., Цурков В.И. Динамические модели управления транспортными ресурсами. *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2025;(6):108–129.  
Kosorukov O.A., Mishchenko A.V., Sviridova O.A., Tsurkov V.I. Dynamic models for transport resource management. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2025;64(6):1014–1035. <https://doi.org/10.1134/S1064230725700819>
17. Борисова О.В., Древинг С.Р., Лосева О.В., Федотова М.А. Меры финансовой господдержки и риск-факторы, влияющие на стоимость инвестиционных проектов по внедрению промышленных робототехнических комплексов. *Финансы: теория и практика*. 2025;29(3):20–34. <https://doi.org/10.26794/2587-5671-2025-29-3-20-34>  
Borisova O.V., Dreving S.R., Loseva O.V., Fedotova M.A. State financial support measures and risk factors affecting the cost of investment projects for the introduction of industrial robotic complex. *Finance: Theory and Practice*. 2025;29(3):20–34. <https://doi.org/10.26794/2587-5671-2025-29-3-20-34>

**Информация об авторах**

**Чувакина Лариса Германовна** – доктор экономических наук, профессор, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: l-econom@mail.ru

**Чувакин Петр Игоревич** – кандидат юридических наук, старший преподаватель, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: Chuvakhin.petr@yandex.ru

**Information about the authors**

**Larisa G. Chuvakhina** – Dr. Sci. (Econ.), Professor, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; e-mail: l-econom@mail.ru

**Peter I. Chuvakhin** – Cand. Sci. (Law), Senior Lecturer, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; e-mail: Chuvakhin.petr@yandex.ru

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 03.02.2026

Поступила после рецензирования: 24.03.2026

Принята к публикации: 02.04.2026

**Article info**

Received: 03.02.2026

Revised: 24.03.2026

Accepted: 02.04.2026