

УДК 502.174:622.2:338.45 © В.Л. Петров✉, М.А. Софронов,
А.П. Булатов, 2026

НИТУ МИСИС, 119049, г. Москва, Россия
✉ e-mail: petrovv@isis.ru

UDC 502.174:622.2:338.45 © V.L. Petrov✉, M.A. Sofronov,
A.P. Bulatov, 2026

National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS),
Moscow, 119049, Russian Federation
✉ e-mail: petrovv@isis.ru

Сравнительный анализ вариантов интеграции возобновляемых источников энергии в системах энергоснабжения горнодобывающих предприятий

Integration of renewable energy in mining power systems: a comparative analysis

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2026-2-24-28>

ПЕТРОВ В.Л.

Доктор техн. наук, профессор,
проректор НИТУ МИСИС,
119049, г. Москва, Россия,
e-mail: petrovv@isis.ru

СОФРОНОВ М.А.

Аспирант НИТУ МИСИС,
119049, г. Москва, Россия

БУЛАТОВ А.П.

Студент НИТУ МИСИС,
119049, г. Москва, Россия

Высокая энергоемкость горнодобывающих предприятий и рост тарифов на электроэнергию обуславливают необходимость поиска путей снижения затрат, в том числе за счет интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Цель исследований: Проведение сравнительного экономического анализа различных конфигураций ВИЭ (ФЭУ, ВЭУ и гибридных систем) для электроснабжения горных предприятий. Задачи: оценить экономическую эффективность автономного использования ФЭУ и ВЭУ; проанализировать показатели гибридных решений; определить влияние регионального фактора. В основе исследования лежат методы дисконтирования денежных потоков (расчет NPV) и анализа жизненного цикла проекта. Основные результаты: экономическая эффективность ВИЭ сильно зависит от локации, ВЭУ демонстрируют наилучшие результаты, окупаясь в пяти из семи регионов, тогда как ФЭУ рентабельны только в трех, гибридные системы в большинстве случаев не показали значительных преимуществ перед isolated ВЭУ, за исключением отдельных регионов, наивысшая эффективность ВЭУ достигнута в арктических и прибрежных зонах.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, горнодобывающие предприятия, экономический анализ, фотоэлектрические установки, ветряные электростанции, гибридные системы, чистая приведенная стоимость, срок окупаемости, энергоснабжение, региональный фактор.

Для цитирования: Петров В.Л., Софронов М.А., Булатов А.П. Сравнительный анализ вариантов интеграции возобновляемых источников энергии в системах энергоснабжения горнодобывающих предприятий // Уголь. 2026;(2):24-28. DOI: 10.18796/0041-5790-2026-2-24-28.

Abstract

The high energy intensity of mining enterprises and rising electricity tariffs necessitate the search for cost reduction methods, including through the integration of renewable energy sources (RES). The study aims to conduct a comparative economic analysis of different RES configurations (PV, wind, and hybrid systems) for power supply to mining enterprises.

The objectives are to assess the economic efficiency of standalone PV and wind power plants, analyze the performance of hybrid solutions, and determine the impact of the regional factor. The research is based on discounted cash flow methods (NPV calculation) and project life cycle analysis. The key findings are: the economic efficiency of RES is highly location-dependent, wind power plants show the best results, being cost-effective in 5 out of 7 regions, whereas PV plants are profitable only in 3, hybrid systems mostly showed no significant advantages over standalone wind power plants, except in certain regions, the highest efficiency of wind power plants was achieved in Arctic and coastal zones.

Keywords

Renewable energy sources, mining enterprises, economic analysis, photovoltaic installations, wind power plants, hybrid systems, net present value (NPV), payback period, power supply, regional factor.

For citation

Petrov V.L., Sofronov M.A., Bulatov A.P. Integration of renewable energy in mining power systems: a comparative analysis. *Ugol'*. 2026;(2):24-28. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2026-2-24-28.

ВВЕДЕНИЕ

Энергоснабжение является одной из ключевых статей операционных расходов для предприятий горнодобывающей промышленности. Высокая энергоемкость технологических процессов, включая добычу, дробление и транспортировку сырья, а также постоянный рост тарифов на электроэнергию оказывают значительное давление на экономическую эффективность данной отрасли [1, 2, 3]. В этой связи поиск путей снижения энергетических затрат становится не просто стратегической задачей, а вопросом конкурентоспособности и устойчивости горных предприятий [4, 5, 6]. При этом необходимо предусматривать решение ряда объективных задач, например задачи расчета и проектирования систем электроснабжения или их элементов, обеспечения их безопасности, энергоэффективности и т.д. [4, 7, 8, 9].

В настоящее время значительная часть электроэнергии в России и странах Евразийского региона генерируется на тепловых электростанциях (ТЭС), работающих на природном газе или угле [10]. Данная модель энергоснабжения не только обуславливает зависимость от колебаний цен на ископаемое топливо, но и создает риски, связанные с потенциальным введением углеродных сборов на международных рынках. В исследовании [11, 12] подчеркивается, что интеграция возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в долгосрочной перспективе способна привести к существенному снижению затрат на электроэнергию. Этот тренд поддерживается за счет постоянного снижения стоимости оборудования для ВИЭ и роста эффективности соответствующих технологий. Некоторые аспекты использования ВИЭ в горной промышленности рассматривались в более ранних исследованиях, но они касались в большей степени технологических решений, не опираясь при этом на экономические оценки и обоснования [13, 14].

Таким образом, экономическая целесообразность применения ВИЭ для горных предприятий требует тщательного анализа. Ключевыми экономическими критериями при этом

выступают: срок окупаемости капитальных вложений, который должен быть меньше срока службы генерирующего оборудования; соотношение затрат на электроэнергию до и после внедрения ВИЭ с учетом амортизационных отчислений; итоговый финансовый результат, оцениваемый через такие показатели, как чистая приведенная стоимость (NPV).

Целью данного исследования является проведение сравнительного экономического анализа различных конфигураций ВИЭ – фотоэлектрических установок (ФЭУ), ветряных электростанций (ВЭУ) и их гибридных комбинаций – для электроснабжения горных предприятий на основе методов дисконтирования денежных потоков и анализа жизненного цикла проекта.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

Оценить экономическую эффективность автономного использования фотоэлектрических установок (ФЭУ) и ветряных электростанций (ВЭУ) на основе ключевых инвестиционных показателей, включая срок окупаемости и чистую приведенную стоимость (NPV).

Проанализировать экономические показатели гибридных решений (ФЭУ+ВЭУ) для выявления синергетического эффекта и определения условий, при которых такие конфигурации являются финансово целесообразными.

Определить влияние регионального фактора на эффективность проектов ВИЭ путем сравнения экономических результатов для различных локаций с учетом их природно-климатических особенностей.

ОТБОР РЕГИОНОВ ПРИМЕНЕНИЯ ВИЭ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Отбор регионов для размещения возобновляемых источников энергии (ВИЭ) проводился на основе анализа перспективных горнодобывающих территорий с учетом их энергетических потребностей, климатических особенностей и потенциала использования солнечной и ветровой энергии. В исследовании рассматриваются семь локаций в различных регионах Российской Федерации, характеризующихся разнообразными географическими и климатическими условиями, что позволяет провести сравнительный анализ эффективности различных конфигураций ВИЭ (табл. 1).

Выбранные точки расположены в регионах с различными природно-климатическими условиями – от арктических территорий до южных районов России, что позволяет оценить влияние регионального фактора на экономическую эффективность проектов ВИЭ для горнодобывающих предприятий.

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРИМЕНЕНИЯ ВИЭ

Для проведения экономического анализа использования фотоэлектрических установок (ФЭУ) были приняты усредненные мировые значения затрат на строительство, соответствующие 95-му перцентилю для Евразийского региона по состоянию на 2024 г. Удельная стоимость сооружения ФЭУ составила 2861 дол. США за 1 кВт установленной мощности [11].

Структура капитальных вложений в строительство ФЭУ на территории Российской Федерации представлена в табл. 2.

Таблица 1

Перечень потенциальных точек размещения ВИЭ

List of potential locations for renewable energy sources

Номер точки	Северная широта, °	Восточная долгота, °	Регион РФ
1	68,054	36,690	Мурманская область
2	68,880	171,272	Чукотский АО
3	66,471	74,913	Ямало-Ненецкий АО
4	54,435	134,116	Хабаровский край
5	55,990	89,283	Красноярский край
6	61,452	171,337	Камчатский край
7	48,671	39,350	Луганская Народная Республика

Эксплуатационные расходы приняты на уровне средних по Евразийскому региону и составляют 7,1 дол. США в год за 1 кВт установленной мощности [11].

Стоимость электроэнергии, вырабатываемой ФЭУ, для стран G20 (95-й процентиль на 2024 г.) составила 0,256 дол. США за 1 кВт·ч [13].

На основе приведенных данных и курса доллара США 78,8623 руб. были рассчитаны единые для всех локаций капитальные затраты на ФЭУ, которые составили 240 млн руб. Годовые амортизационные отчисления составили 585 тыс. руб.

Рассчитанные экономические показатели для ФЭУ в каждой из семи точек представлены в табл. 3.

Годовая выручка приравнивается к годовому объему проданной электроэнергии. В качестве годовых издержек учитывались только амортизационные отчисления. Для определения чистой прибыли необходимо вычесть из выручки все годовые затраты. Учитывая постоянную инфляцию в России, для оценки инвестиционной привлекательности применялся метод дисконтирования денежных потоков.

Расчет чистой приведенной стоимости (NPV) и срока окупаемости производился при ставке дисконтирования 9%. Срок службы ФЭУ принят равным 25 годам [11].

Было принято допущение, что все капитальные вложения осуществляются в нулевой год (начало проекта). Таким образом, совокупные издержки первого года (I_0) включают капитальные вложения и амортизационные отчисления. Для точки № 1 они составили 236,4 млн руб.

Динамика NPV для ФЭУ в точке № 1 за первые 10 лет представлена в табл. 4. Как видно из расчетов, проект не окупается в течение 10 лет, и отрицательное значение NPV сохраняется на протяжении всего срока службы установки.

Таким образом, использование только ФЭУ в точке № 1 является экономически нецелесообразным, так как проект не окупается в течение своего жизненного цикла.

Аналогичный анализ для других точек показал, что окупаемости удается достичь лишь в точках № 4, 5 и 7 – на 20, 20 и 23-м году соответственно. К концу 25-летнего срока NPV в этих точках составила 19,2, 18,9 и 6,3 млн руб.

Для оценки ветряных электростанций (ВЭУ) были использованы следующие удельные показатели по Евразийскому региону: стоимость строительства: 1977 дол. США за 1 кВт установленной мощности; эксплуатационные расходы: 19 дол. США на 1 кВт установленной мощности; стоимость электроэнергии (LCOE): 0,101 дол. США за 1 кВт·ч.

Таблица 2

Структура капитальных затрат на строительство ФЭУ

Structure of capital construction costs of a solar power plant

Графа затрат	% от общей стоимости
Фотоэлектрические модули	31
Сетевые инверторы	7
Монтаж стоек	8
Подключение к сети	11
Кабели/провода	6
Обеспечение мер безопасности	2
Мониторинг и управление оборудованием	1
Механические работы при строительстве	6
Электрические работы при строительстве	6
Авторский надзор	4
Маржа	8
Расходы на финансирование	2
Проектирование	2
Получение разрешений	5
Премирование	1
Реклама	1

Таблица 3

Экономические показатели ФЭУ по точкам размещения

Economic indicators of solar power plants based on their locations

Номер точки	Капитальные вложения, тыс. руб.	Амортизационные отчисления, тыс. руб.	Оценочный потенциал стоимости электроэнергии ФЭУ за 1 календарный год, млн руб.
1	240	585	18,4
2			23,6
3			20,8
4			27,4
5			27,4
6			23,7
7			26,1

Рассчитанные на их основе экономические показатели для ВЭУ сведены в табл. 5.

Результаты расчета NPV для ВЭУ в точке № 1 представлены в табл. 6. Проект окупается на 10-м году, а к концу срока службы дисконтированная прибыль достигнет 820 млн руб., что означает окупаемость инвестиций в 1,47 раза при неизменной стоимости электроэнергии.

Выполним аналогичный расчет NPV для ВЭУ. Полученные результаты представлены в табл. 6.

Для остальных точек данные были сведены в табл. 7. В отличие от ФЭУ, проекты ВЭУ демонстрируют окупаемость в 5 из 7 рассмотренных точек. Наименьший срок окупаемости (6 лет) наблюдается в точке № 3, наибольший (20 лет) – в точке № 5.

На завершающем этапе был проведен анализ гибридной конфигурации (ФЭУ + ВЭУ). Финансовые показатели для данной конфигурации сведены в табл. 8.

Таблица 4

NPV ФЭУ для точки № 1 (первые 10 лет), млн руб.

NPV of a solar power plant at location No. 1 (first decade), million Russian Rubles

t, год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CFt						18,4				
I ₀	236					0,585				
NVP	-220	-205	-191	-179	-167	-157	-147	-139	-131	-124

Таблица 5

Экономические показатели ВЭУ по точкам размещения

Economic indicators of wind-driven power plants based on their locations

Номер точки	Капитальные вложения, тыс. руб.	Амортизационные отчисления, тыс. руб.	Оценочный потенциал стоимости электроэнергии ВЭУ за 1 календарный год, млн руб.
1	654,8	6,3	114
2			96,7
3			158,4
4			8,6
5			86,1
6			76,3
7			122,2

Таблица 6

NPV ВЭУ точки № 1, млн руб.

NPV of a wind-driven power plant at location No. 1, million Russian Rubles

t, год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CFt						0,114				
I ₀	661,1					6,3				
NVP	-556,5	-466,8	-385	-310,5	-242,6	-180,9	-124,8	-73,9	-27,7	14,2

Из результатов анализа установлено, что в гибридной конфигурации срок окупаемости в среднем увеличивается на 2-3 года по сравнению с вариантом только ВЭУ (за исключением точки № 5, где он остался неизменным). Динамика NPV неоднозначна: для точек № 1 – № 4 и № 7 наблюдается снижение прибыли на 1-23%, в то время как для точки № 5 зафиксирован рост NPV на 55%.

Таким образом, применение гибридных систем ФЭУ + ВЭУ в одних случаях практически не влияет на конечную финансовую эффективность или приводит к некоторому снижению прибыли, а в других (как в точке № 5) является наиболее выгодным решением за счет увеличения объема генерации и, как следствие, чистой прибыли.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ выявил сильную зависимость экономической эффективности ВИЭ от географического положения горнодобывающего предприятия.

Солнечная энергетика демонстрирует ограниченный потенциал для горнодобывающей отрасли в рассматриваемых регионах. Ее рентабельность достигается лишь в точках с высоким инсоляционным потенциалом (№ 4, 5, 7), но даже там инвестиции сопряжены с высокими рисками из-за длительных сроков окупаемости.

Ветроэнергетика доказала свою состоятельность как ключевое направление для декарбонизации и снижения энергозатрат в горнодобывающей промышленности.

Таблица 7

Финансовые показатели ВЭУ

Financial indicators of wind-driven power plants

Номер точки	Срок окупаемости, лет	NPV за 25 лет, млн руб.
1	10	308,3
2	14	138,3
3	6	744,3
4	-	-727,9
5	20	34,1
6	-	-62
7	9	388,5

Таблица 8

Сводные финансовые показатели гибридной конфигурации (ФЭУ+ВЭУ)

Summary financial indicators of the hybrid configuration (solar power plant + wind-driven power plant)

Номер точки	Срок окупаемости, лет	NPV за 25 лет, млн руб.
1	13	238,6
2	16	120,1
3	8	698,3
4	-	-708,7
5	20	52,9
6	-	-79,8
7	11	384,8

Особенно высока ее эффективность в арктических и прибрежных регионах (точки № 1, 3, 7), где она обеспечивает быструю окупаемость и значительную прибыль.

Стратегия внедрения должна быть дифференцированной. Для таких регионов, как Ямало-Ненецкий АО (точка № 3), оптимальной является ставка на строительство изолированных ВЭУ. В то же время для некоторых внутренних территорий (например, точка № 5 — Красноярский край) максимальный экономический эффект достигается за счет синергии ветровой и солнечной генерации в рамках гибридных систем.

Список литературы • References

1. Topno S., Umre B., Aware M., Sahoo L. Internal and cross sectional benchmarking of electrical energy use in opencast coal mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(3):232-244. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-03-100.
2. Ключев Р.В. Моделирование и оптимизация удельного электропотребления основных технологических процессов горнодобывающего предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2025;(4):170-181. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_4_0_170.
Klyuev R.V. Modeling and optimization of energy intensity of basic flow processes at mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(4):170-181. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236_1493_2025_4_0_170.
3. Петров В.Л., Кузнецов Н.М., Морозов И.Н. Управление спросом на электроэнергию в горнопромышленном секторе на основе интеллектуальных электроэнергетических систем // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022;(2):169-180. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_169.
Petrov V.L., Kuznetsov N.M., Morozov I.N. Electric energy demand management in mining industry using smart power grids. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(2):169-180. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_169.
4. Ключев Р.В. Системный анализ методов расчета систем электроснабжения карьеров // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16. № 1(59). С. 302-310. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-302-310.
Klyuev R.V. System analysis of calculation methods for power supply systems in quarry points. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024;16(1):302-310. (In Russ.). DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-302-310.
5. Жуковский Ю.Л., Сусликов П.К. Оценка потенциального эффекта применения технологии управления спросом на горных предприятиях // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16. № 3(61). С. 895-908. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908.
Zhukovsky Yu.L., Suslikov P.K. Assessment of the potential effect of applying demand management technology at mining enterprises. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024;16(3):895-908. (In Russ.). DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908.
6. Анализ углеродного следа, создаваемого горными предприятиями / В.И. Силаев, Р.В. Ключев, Д.В. Еремеев и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023;(11-1):265-277. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_265.
Silaev V.I., Klyuev R.V., Ereemeev D.V., Martynova T.A., Danilchenko Yu.V. Analysis of the carbon footprint created by mining enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(11-1):265-277. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_265.
7. Klyuev R.V. Assessment of energy efficiency improvement strategies for ventilation and hoisting systems during the reconstruction of the Molibden mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(1):84-94. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-10-362.
8. Klyuev R.V. Reliability analysis of open-pit power supply system components. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(2):183-194. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-254>.
9. Petrov V.L., Pichuev A.V. Assessing the efficiency of measures to enhance electric power quality in variable-frequency drive for scraper conveyors. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(1):60-69. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-01-198.
10. Углеродный след энергетического сектора / Л.П. Гайнуллина, А.Р. Фасыхов, Н.Ф. Тиммербаев и др. // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2024. Т. 32. № 4. С. 365-384. DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-4-365-384.
Gainullina L.P., Fasykhov A.R., Timerbaev N.F., Ibragimova V.R. Carbon footprint of the energy sector. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2024;32(4):365-384. (In Russ.). DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-4-365-384.
11. Renewable power generation costs in 2024, International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi: IRENA, 2025.
12. Сорокин В.В. Экономические аспекты перехода на низкоуглеродную энергетику // Дискуссия. 2023;(116):46-56.
Sorokin V.V. Economic aspects of the transition to low-carbon energy. *Discussion*. 2023;(116):46-56. (In Russ.). DOI: 10.46320/2077-7639-2023-1-116-46-56.
13. Софронов М.А., Петров В.Л. Перспективы применения солнечных электростанций в системах электроснабжения горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2024;(10):152-165. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_10_0_152.
Sofronov M.A., Petrov V.L. Prospects for solar power plants in electricity supply systems in mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(10):152-165. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236_1493_2024_10_0_152.
14. Хубиева В.М., Внукоев В.Е. Применение альтернативных источников энергии в алмазодобывающей промышленности // Горный журнал. 2024;(2):77-83. DOI: 10.17580/gzh.2024.02.13.
Khubieva V.M., Vnukov V.E. The use of alternative energy sources in the diamond mining industry. *Gornyy zhurnal*. 2024;(2):77-83. DOI: 10.17580/gzh.2024.02.13.

Authors Information

Petrov V.L. – Doctor of Economic Sciences, Professor, Vice Rector, National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation, e-mail: petrovv@misis.ru

Sofronov M.A. – Postgraduate Student, National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation

Bulatov A.P. – Student, National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation

Информация о статье

Поступила в редакцию: 14.11.2025

Поступила после рецензирования: 17.01.2026

Принята к публикации: 29.01.2026

Paper info

Received November 14, 2025

Reviewed January 17, 2026

Accepted January 29, 2026