

Научная статья

УДК 620.92

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-5-30-38

Кергетов Павел Сергеевич

НИГТЦ ДВО РАН

* для корреспонденции: pavelworksc@gmail.com

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ КАМЧАТСКОГО КРАЯ**Информация о статье**

Поступила:

09 апреля 2025 г.

Одобрена после
рецензирования:

30 июня 2025 г.

Принята к печати:

01 сентября 2025 г.

Опубликована:

09 октября 2025 г.

Ключевые слова:

солнечная электростанция, термоэлектрический генератор, модульный реактор, паровой турбогенератор, двигатель свободнопоршневой Стирлинга

Аннотация.

В данной статье освещается вопрос актуальности и перспективности использования альтернативных источников энергоснабжения в горнодобывающих предприятиях Камчатского края как наиболее эффективного способа минимизации транспортных затрат на доставку дизельного топлива в отдаленные районы добычи, а также снижения техногенного воздействия на окружающую среду. Проводится обзорный анализ различных способов электрификации отдаленных горнодобывающих предприятий посредством традиционных и возобновляемых источников электроэнергии. В условиях изолированности региона от Единой энергосистемы России и высокой зависимости от привозного топлива, особенно дизельного, рассматриваются возможности внедрения возобновляемых и автономных энергетических решений. Рассматриваются такие технологии, как паровые турбогенераторы, термоэлектрические генераторы, свободнопоршневые двигатели Стирлинга, малые модульные реакторы и солнечные электростанции. Особое внимание уделено анализу типовых неисправностей оборудования, что позволяет оценить надежность и эффективность каждой из технологий в условиях сурового климата и удаленности объектов. Приведены примеры успешного внедрения солнечных электростанций на горнодобывающих предприятиях как в России, так и за рубежом, что демонстрирует потенциал этих решений. Определяется возможность и перспективность использования солнечных электростанций в качестве источника энергоснабжения при эксплуатации в горнодобывающей отрасли. Приводятся данные об имеющемся на сегодняшний день опыте применения в Камчатском крае солнечных электростанций. По ряду показателей проводится сравнительный анализ с выявлением преимуществ и недостатков. В заключение подчеркивается необходимость комплексного подхода к выбору энергетических решений, учитывающего географические, экономические и экологические особенности региона. Результаты исследования могут служить основой для разработки стратегий устойчивого развития энергетической инфраструктуры в отдаленных районах Камчатки.

Для цитирования: Кергетов П.С. Использование нетрадиционных источников электроэнергии в горной промышленности Камчатского края // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 5 (181). С. 30-38. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-5-30-38, EDN: KYZBXP

Введение

Добыча полезных ископаемых открытым способом занимает лидирующее место в горнодобывающей промышленности благодаря высокой производительности, низким затратам и уровню безопасности. При этом в ближайшее десятилетие первенство будет занимать именно этот метод ведения горных работ. Мировая потребность в твердых полезных ископаемых ежегодно возрастает. В частности, программа развития угольной промышленности России предполагает увеличение добычи угля до

500 млн т. в год к 2030 г. [1]. Природно-ресурсный потенциал Камчатки с обширной прилегающей морской акваторией представляет собой значительную, во многом уникальную часть национального богатства России. На территории Камчатского края имеются месторождения различных полезных ископаемых: золота, серебра, металлов платиновой группы, никеля, меди, кобальта, ртути, железа, титана, ванадия, каменного и бурого угля, торфа, серы, обсидиана, перлита, цеолитизированных туфов, минеральных красок, ювелирно-поделочных кам-

ней, природного газа и конденсата, подземных термальных, минеральных и пресных вод.

Аналитика проблемы

На сегодняшний день в Камчатском Крае ведут свою деятельность более 40 горнодобывающих компаний, а месторождения полезных ископаемых разбросаны по всему полуострову. Из-за отсутствия доступа к централизованным энергосетям энергоснабжение таких отдаленных месторождений чаще всего является локальным по ряду объективных причин. Так, например, золоторудное месторождение Аметистовое расположено в 1100 км от Петропавловска-Камчатского, и ближайшая к месторождению электростанция расположена в 180 км в п. Тилички. Для обеспечения электрической энергией месторождения используются дизель-генераторные установки (ДГУ) в количестве 7 штук единичной мощностью 1250 кВт. Помимо генерирующего оборудования в состав электростанции включены два трансформатора единичной мощностью 6,3 МВА. Однако использование ДГУ сопряжено с высокими эксплуатационными расходами, связанными с закупкой и доставкой топлива, а также с негативным воздействием на окружающую среду из-за выбросов парниковых газов [2, 3].

Анализ видов альтернативных источников

Рассмотрим некоторые альтернативные источники электрической энергии, пригодные для электрификации нужд горнодобывающей промышленности.

Паровые турбогенераторы

Паровые турбогенераторы, работающие по циклу Ренкина, являются основой современных тепловых и атомных электростанций [4]. Этот термодинамический цикл обеспечивает эффективное преобразование тепловой энергии в механическую и далее в электрическую.

Паровые турбогенераторы работают по замкнутому циклу пара – циклу Ренкина (Рис. 1-а). Рабочая жидкость нагревается в парогенераторе до тем-

пературы кипения посредством сжигания газового или угольного топлива [5]. Энергия расширения нагретого пара приводит в движение турбинное колесо, совмещенное с ротором генератора. Далее пар поступает в конденсатор, где конденсируется в жидкое состояние и стекает в насос, закачивающий рабочую жидкость обратно в парогенератор. Цикл продолжается до тех пор, пока к парогенератору подводится тепло. При вращении ротора в генераторе вырабатывается переменный электрический ток, который доводится до нужного качества выпрямительно-инверторной системой [6]. Для повышения эффективности цикла применяются методы, такие как регенерация, где часть тепла отработанного пара используется для подогрева рабочей жидкости, увеличивая общий КПД установки.

В процессе эксплуатации турбогенераторов выявлены следующие виды неисправностей оборудования:

- заклинивание подшипников ротора турбогенератора;
- потеря герметичности корпуса парогенератора;
- выход из строя измерительного термосопротивления;
- выход из строя модуля управления током возбуждения турбогенератора;
- выход из строя контроллера системы управления турбогенератора.

Термоэлектрические генераторы

Термоэлектрические генераторы (ТЭГ) – это устройства, преобразующие тепловую энергию непосредственно в электрическую с использованием термоэлектрического эффекта, в частности эффекта Зеебека. Этот эффект заключается в возникновении электродвижущей силы в замкнутой цепи из двух разнородных материалов при наличии разницы температур между их контактами. Таким образом, при создании температурного градиента между горячей и холодной сторонами термоэле-

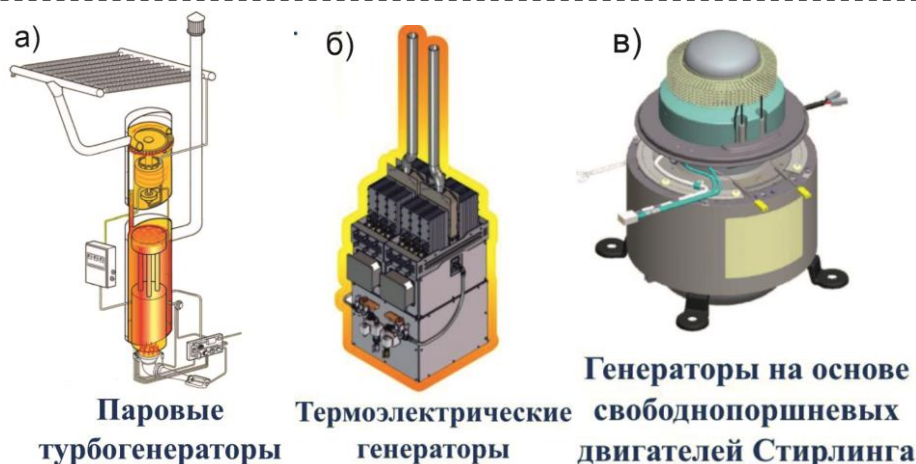


Рис. 1. Альтернативные источники электроэнергии (а – паровые турбогенераторы, б – термоэлектрические генераторы, в – генераторы на основе свободнопоршневых двигателей Стирлинга) [1]

Fig. 1. Alternative sources of electricity (a – steam turbo generators, б – thermoelectric generators, c – generators based on Stirling free-piston engines)[1]

мента возникает электрический ток [7, 8].

Термоэлектрические генераторы (ТЭГ) находят применение в различных отраслях промышленности, включая горнодобывающую, для повышения энергоэффективности и обеспечения автономного электроснабжения технологического оборудования, систем связи и мониторинга, используя местные источники тепла, такие как природный газ или

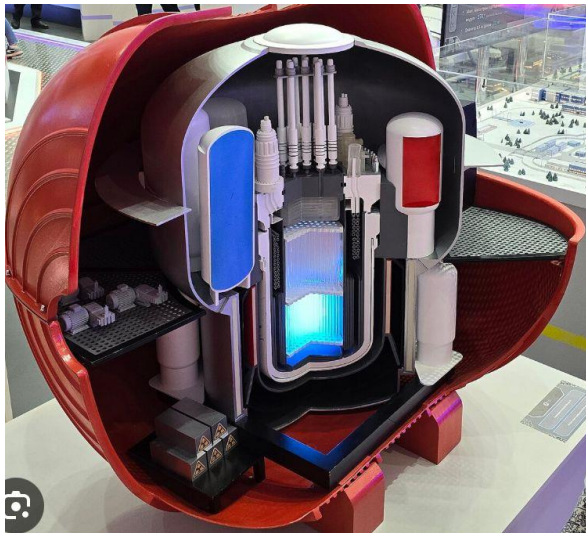


Рис. 2. Малый модульный генератор [1]
Fig. 2. Small modular generator [1]

биомасса (Рис. 1-б).

В процессе работы горнодобывающего оборудования выделяется значительное количество тепла. Установка ТЭГ на выхлопных системах позволяет преобразовывать это тепло в электрическую энергию, снижая потребность во внешних источниках питания и повышая общую эффективность производства.

Функционирование термоэлектрического генератора основано на эффекте Зеебека – при приложении градиента температуры к полупроводниковой структуре на ее выводах образуется термоэлектрическая движущая сила.

Основным компонентом термоэлектрического генератора является термоэлектрический модуль.

Ключевой особенностью термоэлектрических модулей является снижение выходной электрической мощности при термоциклировании, вызванное разрушением полупроводниковой структуры. Разрушение структуры модуля также провоцируется и перегревом. Производители термоэлектрических модулей устанавливают допустимое количество термоциклов в диапазоне 15...20 циклов. Простейший термоэлектрический генератор состоит из горелки, теплоприемника с камерой сгорания, нескольких термоэлектрических модулей и охладителей модулей.

За период эксплуатации автономных источников на основе термоэлектрических элементов были выявлены следующие виды неисправностей оборудования:

- деградация термоэлектрических модулей;
- замыкание термоэлектрического модуля на корпус генератора;

- деформация теплоприемника генератора;
- разрушение излучателя генератора;
- разрушение электрода системы розжига генератора;
- выход из строя источника высокого напряжения системы розжига генератора;
- низкий коэффициент полезного действия (КПД): обычно составляет от 3% до 10%.

Генераторы на основе свободнопоршневых двигателей Стирлинга

Свободнопоршневые двигатели Стирлинга (СПДС) представляют собой перспективную технологию для автономного энергоснабжения в горнодобывающей промышленности (см. Рис. 1-в). Они работают по замкнутому термодинамическому циклу, преобразуя внешнее тепло в механическую энергию без использования кривошипно-шатунного механизма, что снижает количество движущихся частей и повышает надежность системы.

В качестве источников тепла СПДС могут использовать различные источники, включая сжигание топлива, солнечную энергию и отходящее тепло от производственных процессов. Это позволяет адаптировать их к специфическим условиям горнодобывающих предприятий.

Благодаря отсутствию традиционных механических соединений СПДС обладают высокой надежностью и длительным сроком службы. Их конструкция минимизирует износ и необходимость в частом обслуживании. СПДС работают с низким уровнем шума и вибрации, а также могут использовать чистые источники энергии, что способствует снижению негативного воздействия на окружающую среду.

К преимуществам СПДС можно отнести:

- простоту конструкции и отсутствие систем смазки благодаря герметичности.
- высокую надежность и длительный срок службы без необходимости обслуживания.
- возможность использования различных источников тепла, включая солнечную энергию и сжигание топлива [9].

За период эксплуатации выявлены следующие виды неисправностей оборудования:

- загрязнение электродов поджога;
- сложность точного управления движением поршня и синхронизации с генератором;
- необходимость обеспечения эффективного теплообмена для поддержания разности температур;
- потеря герметичности системы охлаждения;
- выход из строя термостата системы охлаждения;
- выход из строя двунаправленного преобразователя.

Малые модульные реакторы

Перспективным направлением для энергоснабжения удаленных горнодобывающих предприятий являются малые модульные реакторы (ММР) (Рис. 2).

Малые модульные реакторы (ММР) – это компактные ядерные установки мощностью ≤ 300 МВт,

собираемые на заводе и доставляемые на площадку в готовых модулях. Они предлагают низкоуглеродную электро- и теплогенерацию там, где крупные АЭС, газовые или угольные станции экономически или логистически нецелесообразны. Благодаря заводскому изготовлению, пассивным системам безопасности и поэтапному наращиванию мощности ММР позиционируются как более быстрый, дешевый и безопасный путь к декарбонизации – от арктических портов до горных рудников. Однако технологии еще далеки от массового коммерческого внедрения: ключевые барьеры – лицензирование, капитальные затраты, неопределенность топливного цикла и обращение с радиоактивными отходами [10]. Они способны обеспечить стабильное и экологически чистое энергоснабжение в регионах, где другие источники энергии недоступны или экономически нецелесообразны. ММР имеют компактные размеры, могут быть установлены в удаленных районах и обладают высокой степенью безопасности. Однако их внедрение требует значительных капитальных вложений и решения вопросов, связанных с регулированием и общественным восприятием атомной энергии [11]. Малые модульные реакторы (ММР) являются относительно новой технологией в ядерной энергетике, и на данный момент отсутствует обширный опыт их эксплуатации. Поэтому данные о типичных неисправностях в ходе их работы ограничены. По мере накопления опыта эксплуатации ММР и проведения дополнительных исследований будут выявляться и решаться специфические технические и эксплуатационные вопросы, связанные с их применением.

Солнечные электрические станции

Солнечные электростанции (СЭС) — это установки, преобразующие солнечную энергию в электричество. Они играют ключевую роль в переходе к устойчивым источникам энергии. Существует несколько типов СЭС, каждый из которых имеет свои особенности и области применения [12].

Основные типы солнечных электростанций:

- сетевые (On-Grid) станции

Подключены к общей электросети и предназначены для снижения потребления электроэнергии из сети. Избыточная энергия может быть передана обратно в сеть, что позволяет получать компенсацию или доход. Такие системы обычно не требуют аккумуляторов, так как сеть используется в качестве резервного источника энергии.

- автономные (Off-Grid) станции

Работают независимо от электросети и используются в удаленных районах или местах без доступа к сети. Они включают солнечные панели, аккумуляторы для хранения энергии и инверторы для преобразования тока. Обеспечивают полную автономность, но требуют наличия аккумуляторов для хранения энергии.

- гибридные станции

Сочетают функции сетевых и автономных систем. Могут работать как с подключением к сети, так и без него, используя аккумуляторы и при необходимости дополнительные источники энергии, такие как генераторы. Обеспечивают надеж-

ность и гибкость в условиях нестабильного электроснабжения [13, 14].

Использование солнечных электростанций на горнодобывающих предприятиях обладает рядом преимуществ перед другими видами альтернативных источников энергии, что делает их привлекательным выбором для многих регионов и условий эксплуатации [15].

Основные преимущества включают:

- универсальность установки. Солнечные панели могут быть установлены в самых разных местах – от крыш зданий до больших солнечных ферм, что позволяет адаптировать их к различным ландшафтам и потребностям [16];

- минимальное воздействие на окружающую среду. В отличие от гидроэлектростанций, которые могут изменять экосистемы рек, или ветряных турбин, потенциально влияющих на миграцию птиц, солнечные панели имеют меньшее воздействие на местную фауну и флору;

- низкие эксплуатационные расходы. После установки солнечные панели требуют минимального обслуживания и не нуждаются в топливе для работы, что снижает долгосрочные затраты [17];

- быстрое развертывание: Солнечные электростанции можно установить и ввести в эксплуатацию относительно быстро по сравнению с другими ВИЭ, такими как геотермальные или гидроэлектростанции, строительство которых может занять годы;

- снижение затрат на электроэнергию. Интеграция СЭС позволяет существенно уменьшить расходы на покупку электроэнергии от внешних поставщиков. Например, в горнодобывающей отрасли экономия может достигать 30% [18].

- экологическая устойчивость: СЭС не производят вредных выбросов, что способствует улучшению экологической обстановки в районе предприятия и снижает углеродный след производства.

Стоит также упомянуть и о типовых неисправностях, выявляемых в ходе эксплуатации СЭС:

- деградация солнечных панелей. Со временем панели могут терять эффективность из-за воздействия внешних факторов, таких как перепады температуры, влажность и механические нагрузки. Это приводит к образованию микротрещин и ухудшению электрических соединений;

- электрическая коррозия. Влага, проникающая через повреждения в защитном слое, может вызывать окисление контактов и нарушение электропроводности, что в конечном итоге приводит к выходу панели из строя [19];

- перегрев панелей. Высокие температуры снижают КПД солнечных панелей. При перегреве эффективность генерации электроэнергии может снижаться на 10-30% в зависимости от погодных условий.

- затенение панелей. Частичное затенение из-за окружающих объектов или загрязнений (листья, пыль) может создавать «горячие точки» (hot-spots), приводящие к локальному перегреву и повреждению элементов панели.

– неправильная установка и соединения. Ошибки при монтаже, такие как некачественные соединения или неверное заземление, могут привести к снижению эффективности системы и повышенному риску неисправностей [20]. Повреждения от внешних воздействий: сильные порывы ветра, град или другие погодные явления могут физически повредить панели, вызывая трещины или другие дефекты [21].

– проблемы с инверторами. Инверторы, преобразующие постоянный ток от панелей в переменный, могут выходить из строя из-за перегрева, перенапряжения или износа компонентов [22, 23].

Однако регулярное техническое обслуживание, правильный монтаж и использование качественных компонентов помогают минимизировать риск возникновения перечисленных неисправностей и продлить срок службы солнечной электростанции [24, 25].

Некоторые примеры внедрения солнечных электростанций на горнодобывающих предприятиях в России и мире

Компания Iamgold оснастила свой золотой рудник Essakane в Буркина-Фасо солнечной электростанцией мощностью 12,5 МВт, что позволило снизить потребление мазута и уменьшить выбросы CO₂. Однако интеграция ВИЭ требует учета факторов, таких как климатические условия, необходимость резервных мощностей и первоначальные инвестиции.

Солнечная электростанция на алмазном руднике Diavik, Канада: компания Rio Tinto завершила строительство солнечной электростанции на своем алмазном руднике Diavik. Эта установка обеспечивает до 25% потребностей рудника в электроэнергии во время работ по закрытию, снижая зависи-



*Рис. 3. Солнечная электрическая станция [1]
Fig. 3. Solar electric station [1]*

мость от традиционных источников энергии и уменьшая выбросы парниковых газов.

Гибридная энергетическая система на медно-золотом руднике DeGrussa, Австралия: в Западной Австралии на руднике DeGrussa была внедрена

гибридная система, сочетающая 10,6 МВт солнечной фермы с 6 МВт батарейной системой и резервными дизельными генераторами. Эта интеграция позволила снизить потребление топлива более чем на 20%, обеспечивая стабильное энергоснабжение и сокращая операционные расходы.

Солнечная ферма Bedburg, Германия: компания RWE разработала солнечную ферму Bedburg на рекультивированной территории бывшего открытого угольного разреза. Этот проект демонстрирует возможность использования восстановленных земель для производства зеленой энергии, способствуя устойчивому развитию региона.

Солнечная электростанция Еххаго, Южная Африка: горнодобывающая компания Еххаго Resources Limited планирует строительство солнечной электростанции мощностью 70 МВт для обеспечения энергией угольного рудника Grooteegeluk. Этот шаг направлен на снижение углеродного следа предприятия и повышение энергетической независимости.

Солнечная электростанция Belmont Mine, Бразилия: рудник Belmont, занимающийся добычей изумрудов, внедрил солнечную электростанцию мощностью 1,5 МВт. Этот проект подчеркивает стремление компании к экологически чистому производству и снижению воздействия на окружающую среду.

Примеры внедрения СЭС в горнодобывающей отрасли России:

Компания «Полиметалл»: этот ведущий производитель драгоценных металлов активно внедряет зеленые технологии на своих предприятиях. В частности, на золотодобывающих объектах компании в Хабаровском крае установлены солнечные панели, что способствует снижению выбросов парниковых газов и повышению энергоэффективности производств [26].

В Камчатском Крае имеется уже имеется опыт эксплуатации СЭС в муниципальном секторе. Так, в 2023 году компания «Камчатскэнерго» (входит в Группу РусГидро) построила первую на Камчатке промышленную солнечную электростанцию (СЭС) установленной мощностью 107,2 кВт, которая работает совместно с действующей ДЭС в с. Долиновка и обеспечивает частичное замещение выработки дизель-генераторов за счет возобновляемой энергии. В рамках проекта смонтировано 256 солнечных панелей и установлены сетевые инверторы. Территория СЭС составляет 1 Га.

Среднегодовой объем выработки чистой, «зеленой» электроэнергии новым объектом ВИЭ-генерации составит до 115 тыс. кВт·ч, что позволит сократить расход дизельного топлива на 67 т в год и существенно снизить негативное воздействие на окружающую среду.

Эти примеры иллюстрируют успешное применение солнечной энергии в горнодобывающей промышленности, способствуя повышению энергоэффективности, снижению эксплуатационных затрат и уменьшению негативного воздействия на окружающую среду.

Обсуждение результатов

Выбор оптимального решения для электро-снабжения отдаленных горнодобывающих предприятий зависит от множества факторов, включая географическое положение, доступность ресурсов, экономические и экологические аспекты [27].

Хотя конкретные проекты внедрения СЭС на горнодобывающих предприятиях России пока немногочисленны, интерес к возобновляемым источникам энергии в отрасли растет. Компании рассматривают возможность использования солнечных электростанций для обеспечения энергией удаленных объектов и снижения операционных затрат [28, 29, 30]. В целом, несмотря на начальную стадию внедрения, использование солнечных электростанций в российской горнодобывающей промышленности имеет потенциал для дальнейшего развития, особенно в контексте глобальных тенденций по переходу к устойчивым и экологически чистым источникам энергии.

Вывод

Таким образом, комбинация традиционных и альтернативных источников энергии с учетом специфики каждого предприятия может обеспечить надежное, экономически эффективное и экологически устойчивое энергоснабжение.

Внедрение солнечных электростанций на горных предприятиях представляет собой стратегически важный шаг к устойчивому и эффективному развитию. Горные регионы, как правило, характеризуются высокой солнечной активностью, что делает их идеальными для использования солнечной энергии. Среди ключевых преимуществ можно выделить экономическую эффективность: после первоначальных инвестиций в установку солнечных панелей предприятия могут значительно сократить операционные расходы на электроэнергию. Это особенно актуально в условиях нестабильных цен на традиционные энергоносители. Кроме того, использование солнечных электростанций способствует снижению выбросов парниковых газов, что соответствует современным требованиям экологической ответственности и устойчивого развития. Это не только улучшает экологический имидж предприятия, но и может привлечь дополнительную поддержку со стороны государства и международных организаций. Технические аспекты также играют важную роль: современные солнечные электростанции отличаются высокой надежностью, длительным сроком службы и минимальными затратами на обслуживание. Это обеспечивает стабильное энергоснабжение даже в отдаленных и труднодоступных горных районах.

Таким образом, интеграция солнечных электростанций в горные предприятия не только способствует экономической и экологической эффективности, но и укрепляет энергетическую независимость, что является важным фактором в условиях современных вызовов и изменений на энергетическом рынке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубов Г. М., Трухманов Д. С., Чегошев А. А., Нохрин С. А., Ельцов И. Е. Сниже-

ние техногенного воздействия на окружающую среду посредством использования альтернативных видов энергоносителей при эксплуатации тяжелых карьерных самосвалов // Горное оборудование и электромеханика 2021. № 5 (157). С. 19–28. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-5-19-28.

2. Веселов Ф., Соляник А., Урванцева Л. Низкоуглеродная перестройка электроэнергетики России до 2035 года: потенциал снижения эмиссии CO₂ и его «цена» для потребителя // Энергетическая политика. 2021. № 11(165). С. 30–43. DOI: 10.46920/2409-5516_2021_11165_30.

3. Артамонов Г. Е., Васенев И. И., Гутников В. А. Экологическая оценка углеродного и азотного следа объектов тепловой энергетики в условиях города Москвы // Экология. 2023. № 4. С. 16–25. DOI: 10.24412/1816-1863-2023-4-16-25.

4. Цикл Ренкина паросиловой установки: состав, диаграмма, термический КПД [Электронный ресурс] // <https://altenergetika.ru/czikl-renkina> 2025.05.25

5. Ustaoglu A. [et al]. Advanced exergy analysis of an integrated solid waste fueled cogeneration system based on organic Rankine Cycle for different working fluids // Energy Convers. and Manag. 2022.

6. Yağlı H. [et al]. Optimisation of simple and regenerative organic Rankine cycles using jacket water of an internal combustion engine fuelled with biogas produced from agricultural waste // Energy. 2023.

7. Термoeлектрические генераторы [Электронный ресурс] // Студопедия // https://studopedia.ru/5_30087_termoelektricheskie-generatori 2025.05.25

8. Термoeлектрический генератор: принцип работы, применение, как сделать [Электронный ресурс] // AGT-Generator // <https://agt-generator.ru/termoelektricheskiy-generator-printsip-raboty-primenenie-kak-sdelat> 2025.05.25

9. Энергоснабжение на основе двигателя-генератора Стирлинга [Электронный ресурс] // Вторая индустриализация России // <https://xn--80aaaftebbc3auk2aepkhr3ewjpa.xn--plai/energосnabzhenie-stirlinga> 2025.05.25

10. Что такое малые модульные реакторы (ММР)? [Электронный ресурс] // IAEA // <https://www.iaea.org/ru/newscenter/news/chto-takoe-malye-modulnye-reaktory-mmр> 2025.05.25

11. Возобновляемые источники энергии на добыче полезных ископаемых [Электронный ресурс] // Золотодобыча. 2017. <https://zolotodb.ru/article/11199>. 2025.4.7

12. Виды солнечных электростанций: сетевые, автономные, гибридные [Электронный ресурс] // Технолайн // <https://e-solarpower.ru/stati/vidy-solnechnyh-elektrostanciy> 2025.05.25

13. Что такое солнечная электростанция? [Электронный ресурс] // А.ЕКО // <https://a.eco/blog/solar-guide/chto-takoe-solnechnaya-elektrostantsiya> 2025.05.25

14. Солнечная энергетика (рынок России) [Электронный ресурс] // TAdviser. 2023. <https://www.tadviser.ru/index.php>. 2025.4.7

15. Софронов М. А., Петров В. Л. Перспективы применения солнечных электростанций в системах электроснабжения горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. № 10. С. 152–165. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_10_0_152.153. giab-online.ru

16. Электроснабжение месторождений. Век солнечной энергетики [Электронный ресурс] // Добывающая промышленность. 2019. <https://dprom.online/unsolution/elektrosnabzhenie-mestorozhdenij-vek-solnechnoj-energetiki>. 2025.4.5

17. Солнце, воздух и вода: ВИЭ на объектах добычи Казахстана [Электронный ресурс] // Добывающая промышленность Казахстана. 2022. <https://dprom.kz/trendy/vie-na-obektah-dobychi-kazahstana>. 2025.4.6

18. Солнечная энергия Полиметалла [Электронный ресурс] // Журнал «Глобус». 2021. <https://www.vnedra.ru/glavnaya-tema/po-puti-zelyonyh-tehnologij-16832>. 2025.4.6

19. Газ, нефть и солнце [Электронный ресурс] // Журнал «Глобус». 2022. <https://www.vnedra.ru/tehnika/oborudovanie/gaz-nefti-solncze-19400>. 2025.4.8

20. Влияние солнечной энергетики на развитие горнодобывающей отрасли в Республике Куба [Электронный ресурс] // КиберЛенинка. <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-solnechnoy-energetiki-na-razvitie-gornodobyvayuschey-otrasli-v-respublike-kuba>. 2025.4.8

21. Солнечные электростанции для бизнеса [Электронный ресурс] // ВЕМ. <https://bem.pro/ses>. 2025.4.8

22. Перспективы создания плавучих солнечных электростанций в России [Электронный ресурс] // Инженерные системы. 2020. <https://www.inesnet.ru/article/perspektivy-sozdaniya-plavuchix-solnechnyx-elektrostancij-v-rossii>. 2025.4.9

23. Солнечная фотоэлектрическая станция (СФЭС / PV) [Электронный ресурс] // ESFC. <https://esfccompany.com/articles/solnechnaya-energetika/solnechnye-fotoelektricheskie-stantsii-novye-tehnologii-i-tendentsii-rynka>. 2025.4.9

24. Солнечные электростанции: эксплуатация на незадействованных площадках нефтегазового комплекса [Электронный ресурс] // Нефтегазовая вертикаль. – 2021.

<https://magazine.neftegaz.ru/articles/vozobnovlyaemye-istochniki-energii/697644-solnechnye-elektrostantsii-ekspluatatsiya-na-nezadeystvovannykh-ploshchadkakh-neftegazovogo-kompleks>. 2025.4.9

25. Еникеева А. Р., Шарипов Б. А., Федосеева Е. А. Применение нетрадиционных источников энергии для покрытия нагрузки на подогрев резервуаров // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2019. № 3. С. 30–35. DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-3-30-35.

26. Степаненко В. С., Мальшаков И. Н. Перспективы применения в горной промышленности суперконденсаторных накопителей и возобновляемых источников энергии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 6. С. 153–163.

27. Бастрон А. В., Бастрон Т. Н., Наумов И. В., Ямщикова И. В. Техничко-экономический аспект использования солнечных электростанций в системах электроснабжения сельскохозяйственного производства и быта в условиях Сибири // Социально-экономический и гуманитарный журнал Красноярского ГАУ. 2023. № 3. С. 101–116. DOI: 10.36718/2500-1825-2023-3-101-116.

28. Яшалова Н. Н., Потравный И. М. Инструменты обеспечения углеродной нейтральности в российском угольном бизнесе // Уголь. 2023. № 10. С. 66–71. DOI: 10.1016/j.joule.2024.01.007. 163 2.

29. Бастрон А. В., Бастрон Т. Н., Наумов И. В., Ямщикова И. В. Техничко-экономический аспект использования солнечных электростанций в системах электроснабжения сельскохозяйственного производства и быта в условиях Сибири // Социально-экономический и гуманитарный журнал Красноярского ГАУ. 2023. № 3. С. 101–116. DOI: 10.36718/2500-1825-2023-3-101-116.

30. Шуткин О. И. Оценка конкурентоспособности солнечной генерации в электроэнергетике России // Энергетическая политика. 2014. № 1. С. 67–77.

© 2025 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Кергетов Павел Сергеевич, аспирант, НИГТЦ ДВО РАН, 683003, Россия, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ленинградская, 79, e-mail: pavelworksc@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Кергетов Павел Сергеевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

USE OF ALTERNATIVE ELECTRICITY SOURCES IN THE MINING INDUSTRY OF KAMCHATKA KRAI



Article info

Received:

09 April 2025

Accepted for publication:

30 June 2025

Accepted:

01 September 2025

Published:

09 October 2025

Keywords: solar power plant; thermoelectric generator; modular reactor; steam turbogenerator; free-piston Stirling engine.

Abstract.

This article highlights the relevance and prospects of using alternative energy sources in mining enterprises of the Kamchatka Territory as the most effective way to minimize transportation costs for the delivery of diesel fuel to remote mining areas, as well as to reduce the man-made impact on the environment. A review analysis of various methods of electrification of remote mining enterprises using traditional and renewable energy sources is carried out. In the conditions of the region's isolation from the Unified Energy System of Russia and high dependence on imported fuel, especially diesel, the possibilities of introducing renewable and autonomous energy solutions are considered. Technologies such as steam turbogenerators, thermoelectric generators, free-piston Stirling engines, small modular reactors and solar power plants are considered. Particular attention is paid to the analysis of typical equipment failures, which allows us to assess the reliability and efficiency of each technology in harsh climates and remoteness of facilities. Examples of successful implementation of solar power plants at mining enterprises both in Russia and abroad are given, which demonstrates the potential of these solutions. The possibility and prospects of using solar power plants as a source of energy supply during operation in the mining industry are determined. Data on the current experience of using solar power plants in the Kamchatka Territory are provided. A comparative analysis is carried out for a number of indicators, identifying advantages and disadvantages. In conclusion, the need for an integrated approach to choosing energy solutions is emphasized, taking into account the geographical, economic and environmental features of the region. The results of the study can serve as a basis for developing strategies for the sustainable development of energy infrastructure in remote areas of Kamchatka.

For citation: Kergetov P.S. Use of non-traditional sources of electricity in the mining industry of the Kamchatka Territory. Mining Equipment and Electromechanics, 2025; 5(181):30-38 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2025-5-30-38, EDN: KYZBXP

REFERENCES

1. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Chegoshev A.A., Nokhrin S.A., Yeltsov I.E. Reducing the technogenic impact on the environment through the use of alternative energy sources in the operation of heavy quarry dump trucks. *Mining equipment and electromechanics*. 2021; 5 (157):19–28. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-5-19-28.
2. Veselov F., Solyanik A., Urvantseva L. Low-carbon restructuring of the Russian electric power industry until 2035: the potential for reducing CO2 emissions and its "price" for the consumer. *Energy policy*. 2021; 11(165):30–43. DOI: 10.46920/2409-5516_2021_11165_30.
3. Artamonov G.E., Vasenev I.I., Gutnikov V.A. Environmental assessment of the carbon and nitrogen

footprint of thermal power plants in Moscow. *Ecology*. 2023; 4:16–25. DOI: 10.24412/1816-1863-2023-4-16-25.

4. Rankine cycle of a steam power plant: composition, diagram, thermal efficiency [Electronic resource]. <https://altenergetika.ru/czikl-renkina> 2025.05.25

5. Ustaoglu A. [et al.] Advanced exergy analysis of an integrated solid waste fueled cogeneration system based on organic Rankine Cycle for different working fluids. *Energy Convers. and Manag.* 2022.

6. Yağlı H. [et al.] Optimization of simple and regenerative organic Rankine cycles using jacket water of an internal combustion engine fuelled with biogas produced from agricultural waste. *Energy*. 2023.

7. Thermoelectric Generators [Electronic resource]. Studopedia. https://studopedia.ru/5_30087_termoelektricheskie-generatori 2025.05.25

8. 8. Thermoelectric Generator: Operating Principle, Application, How to Make [Electronic resource]. AGT-Generator. <https://agt-generator.ru/termoelektricheskiy-generator-printsip-raboty-primenenie-kak-sdelat> 2025.05.25
9. Power Supply Based on a Stirling Engine-Generator [Electronic resource]. The Second Industrialization of Russia. <https://xn--80aaaftebbc3auk2aepkhr3ewjpa.xn--plai/energostonabzhenie-stirlinga> 2025.05.25
10. What are Small Modular Reactors (MMR)? [Electronic resource]. IAEA. <https://www.iaea.org/ru/newscenter/news/chto-takoe-malye-modulnye-reaktory-mmrm> 2025.05.25
11. Renewable energy sources in mining [Electronic resource]. Gold mining. 2017. <https://zolotodb.ru/article/11199>. 2025.4.7
12. Types of solar power plants: grid, autonomous, hybrid [Electronic resource]. Technoline. <https://e-solarpower.ru/stati/vidy-solnechnyh-elektrostantsiy> 2025.05.25
13. What is a solar power plant? [Electronic resource]. A.ECO. <https://a.eco/blog/solar-guide/chto-takoe-solnechnaya-elektrostantsiya> 2025.05.25
14. Solar energy (Russian market) [Electronic resource]. TAdviser. 2023. <https://www.tadviser.ru/index.php>. 2025.4.7
15. Sofronov M.A., Petrov V.L. Prospects for the use of solar power plants in power supply systems of mining enterprises. *Mining information and analytical bulletin*. 2024; 10:152–165. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_10_0_152.153. giab-online.ru
16. Power supply of deposits. The century of solar energy [Electronic resource] // Mining industry. 2019. <https://dprom.online/unsolution/elektrostonabzhenie-mestorozhdenij-vek-solnechnoj-energetiki>. 2025.4.5
17. Sun, air and water: Renewable energy sources at production sites of Kazakhstan [Electronic resource]. Mining industry of Kazakhstan. 2022. <https://dprom.kz/trendy/vie-na-obektah-dobychi-kazahstana>. 2025.4.6
18. Solar energy of Polymetal [Electronic resource]. Globus magazine. 2021. <https://www.vnedra.ru/glavnaya-tema/po-puti-zelyonyh-tehnologij-16832>. 2025.4.6
19. Gas, oil and sun [Electronic resource]. Globus Magazine. 2022. <https://www.vnedra.ru/tehnika/oborudovanie/gaz-neft-i-solncze-19400>. 2025.4.8
20. The impact of solar energy on the development of the mining industry in the Republic of Cuba [Electronic

- resource]. CyberLeninka. <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-solnechnoy-energetiki-na-razvitie-gornodobyvayushey-otrasli-v-respublike-kuba>. 2025.4.8
21. Solar power plants for business [Electronic resource]. BEM. <https://bem.pro/ses>. 2025.4.8
22. Prospects for the Creation of Floating Solar Power Plants in Russia [Electronic resource]. Engineering Systems. 2020. <https://www.inesnet.ru/article/perspektivy-sozdaniya-plavuchix-solnechnyx-elektrostantsiy-v-rossii>. 2025.4.9
23. Solar Photovoltaic Power Station (SPES / PV) [Electronic resource]. ESFC. <https://esfccompany.com/articles/solnechnaya-energetika/solnechnye-fotoelektricheskie-stantsii-novye-tehnologii-i-tendentsii-rynka>. 2025.4.9
24. Solar Power Plants: Operation on Unused Sites of the Oil and Gas Complex [Electronic resource]. Oil and Gas Vertical. 2021. <https://magazine.neftegaz.ru/articles/vozobnovlyaemye-istochniki-energii/697644-solnechnye-elektrostantsii-ekspluatatsiya-na-nezadeystvovannykh-ploshchadkakh-neftegazovogo-kompleksa>. 2025.4.9
25. Enikeeva A.R., Sharipov B.A., Fedoseeva E.A. Application of non-traditional energy sources for coatings
26. Stepanenko V.S., Mal'shakov I.N. Prospects for the Application of Supercapacitor Storage Devices and Renewable Energy Sources in the Mining Industry. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2017; 6:153–163.
27. Bastron A.V., Bastron T.N., Naumov I.V., Yamshchikova I.V. Technical and Economic Aspects of Using Solar Power Plants in Power Supply Systems for Agricultural Production and Everyday Life in Siberia. *Socio-Economic and Humanitarian Journal of the Krasnoyarsk State Agrarian University*. 2023; 3:101–116. DOI: 10.36718/2500-1825-2023-3-101-116.
28. Yashalova N.N., Potravny I.M. Instruments for Ensuring Carbon Neutrality in the Russian Coal Business. *Coal*. 2023; 10:66–71. DOI: 10.1016/j.joule.2024.01.007. 163 2
29. Bastron A.V., Bastron T.N., Naumov I.V., Yamshchikova I.V. Technical and economic aspect of using solar power plants in power supply systems for agricultural production and everyday life in Siberia. *Socio-Economic and Humanitarian Journal of the Krasnoyarsk State Agrarian University*. 2023; 3:101–116. DOI: 10.36718/2500-1825-2023-3-101-116.
30. Shutkin O.I. Assessment of the competitiveness of solar generation in the electric power industry of Russia. *Energy Policy*. 2014; 1:67–77.

© 2025 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Pavel S. Kergetov, graduate student, NIGTC FEB RAS, 683003, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky, Leningradskaya st., 79, e-mail: pavelworksc@gmail.com

Contribution of the authors:

Pavel S. Kergetov – formulation of a research problem, scientific management, conceptualization of research, data collection and analysis, review of relevant literature, conclusions.

Authors have read and approved the final manuscript.

