

УДК 621.311.243  
DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4741  
Шифр специальности ВАК: 2.4.5, 2.4.5  
Научная статья

## Оценка применимости ручных трекерных установок в фотоэлектрических станциях микро-мощности в условиях Севера

Н.П. Местников<sup>1,2✉</sup>, В.З. Манусов<sup>3</sup>, П.Ф. Васильев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Россия, г. Якутск

<sup>2</sup> Институт физико-технических проблем Севера имени В.П. Ларионова ЯНЦ СО РАН, Россия, г. Якутск

<sup>3</sup> Новосибирский государственный технический университет, Россия, г. Новосибирск

✉ sakhacase@bk.ru

**Аннотация. Актуальность.** Электроснабжение отдаленных населенных пунктов Севера производится с помощью автономных энергосистем, представляющих собой совокупность дизель-генераторных установок. Данные установки потребляют значительные объемы дорогостоящего дизельного топлива. Уменьшение объемов потребления топлива путем применения объектов возобновляемой энергетики имеет прикладную актуальность и востребованность. **Цель.** Оценка возможности применения ручных трекерных установок в фотоэлектрических станциях микро-мощности, функционирующих в составе автономных энергосистем, на территории Севера путем выполнения натурных исследований. **Методы.** Методы определения эффективности использования ручных и автоматических трекерных установок для фотоэлектрических станций, обработки экспериментальных данных. **Результаты и выводы.** Идентифицированы показатели повышения выработки электроэнергии до и после внедрения трекерных установок. Вычислены объемы снижения потребления дизельного топлива в автономной энергосистеме в зависимости от вида трекерной установки. Сформированы рекомендации по устойчивой эксплуатации ручных трекерных установок для фотоэлектрических станций микро-мощности. Обоснована невозможность применения ручных трекерных установок в объектах гелиоэнергетики малой и крупной мощности по причине высоких трудозатрат. Полученные результаты прикладных исследований могут быть применены в обновлении существующего перечня технических мероприятий по усовершенствованию фотоэлектрических станций, размещенных на территории Севера. Капитальная стоимость ручных трекерных установок меньше на 70–80 %, чем ее автоматические аналоги. Данный вид установок увеличивают среднесуточную выработку электроэнергии от фотоэлектрической станции на 17–18 % при условии изменении ориентации фотоэлектрических панелей относительно Солнца в ежедневном порядке. По результатам проведения технико-экономической оценки определено, что в случае внедрения ручных трекерных установок в фотоэлектрическую станцию установленной мощностью 20 кВт в с. Тойон-Арыы достигается среднегодовая экономия дизельного топлива до 8,8 т со сроком окупаемости до 11,7 лет. Уменьшается углеродный след в исследуемой энергосистеме в виде снижения объемов выброса CO<sub>2</sub> до 27,7 т в год.

**Ключевые слова:** фотоэлектрическая панель, фотоэлектрическая станция, экономия топлива, трекерная установка, Север

**Благодарности:** Представленная работа произведена в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FSRG-2025-0009 «Разработка новых подходов быстрого и масштабируемого синтеза электродных материалов на основе графена для суперконденсаторов» и государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FWRS-2024-0031 «Комплексные исследования приоритетов развития энергетики Республики Саха (Якутия) с учетом влияния на окружающую среду и разработка способов, методов повышения энергетической эффективности и надежности локальных электроэнергетических систем труднодоступных, изолированных территорий Севера и Арктики» по приоритетному направлению ПФНИ в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы) 2.5.1 – Энергетика и рациональное природопользование.

**Для цитирования:** Местников Н.П., Манусов В.З., Васильев П.Ф. Оценка применимости ручных трекерных установок в фотоэлектрических станциях микро-мощности в условиях Севера // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 6. – С. 7–18. DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4741

---

UDC 621.311.243  
DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4741  
Scientific paper

## Assessing the applicability of manual trackers in PV-micropower stations in the North

N.P. Mestnikov<sup>1,2✉</sup>, V.Z. Manusov<sup>3</sup>, P.F. Vasilyev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> North-Eastern Federal University named M.K. Ammosov, Yakutsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Institute of Physical and Technical Problems of the North named V.P. Larionov of Yakut Science Center SB RAS,  
Yakutsk, Russian Federation

<sup>3</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

✉ sakhacase@bk.ru

**Abstract. Relevance.** Electricity supply to remote settlements in the North is carried out using autonomous power systems, which are a combination of diesel generator units. These units consume significant volumes of expensive diesel fuel. Reducing the volume of fuel consumption by using renewable energy facilities has practical relevance and demand. **Aim.** Evaluation of the possibility of using manual tracker units in micro-power PV-power plants operating as part of autonomous power systems in the North by performing in-kind studies. **Methods.** Methods of determining the efficiency of using manual and automatic tracker units for PV-power plants, and processing experimental data. **Results and conclusions.** The authors have identified the indicators of increase in electricity generation before and after the introduction of tracker units. The volumes of reduction in diesel fuel consumption in an autonomous power system are calculated depending on the type of tracker unit. Recommendations for the sustainable operation of manual tracker units for micro-power PV-power plants are formed. The authors substantiated the impossibility of using manual tracker units in small and large-capacity solar energy facilities due to high labor costs. The obtained results of applied research can be used to update the existing list of technical measures to improve PV-power plants located in the North. The capital cost of manual tracker units is 70–80% less than their automatic counterparts. This type of units increases the average daily electricity generation from a PV-power plant by 17–18% provided that the orientation of the PV-panels relative to the Sun changes hourly. Based on the results of the technical and economic assessment, it was determined that in the case of introducing manual tracker units into a PV-power plant with an installed capacity of 20 kW in the village of Toyon-Aryy, an average annual saving of diesel fuel of up to 8.8 tons is achieved with a payback period of up to 11.7 years. The carbon footprint in the energy system under study is reduced in the form of a decrease in CO<sub>2</sub> emissions to 27.7 tons per year.

**Keywords:** PV-panel, PV-power plant, fuel economy, tracker installation, North

**Acknowledgments:** The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation FSRG-2025-0009 "Development of new approaches to fast and scalable synthesis of graphene-based electrode materials for supercapacitors" and the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation FWRS-2024-0031 "Comprehensive studies of the priorities for the development of energy in the Republic of Sakha (Yakutia), taking into account the impact on the environment and the development of ways and methods to improve the energy efficiency and reliability of local electric power systems in hard-to-reach, isolated territories of the North and the Arctic" in the priority area of PFNI in the Russian Federation for the long-term period (2021–2030) 2.5.1 – Energy and rational nature management.

**For citation:** Mestnikov N.P., Manusov V.Z., Vasilyev P.F. Assessing the applicability of manual trackers in PV-micropower stations in the North. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 6, pp. 7–18. DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4741

---

### Введение

Электроснабжение населенных пунктов на изолированных и отдаленных территориях Северо-Востока России производится с помощью автономных энергосистем. Данные энергосистемы состоят из элементов производства, преобразования, передачи и распределения электроэнергии, в том числе с применением модульных дизель-генераторных установок, функционирующих путем сжигания дизельного топлива [1–4].

Северо-Восток России имеет слаборазвитую транспортную инфраструктуру, в которой отсутствуют крупные железнодорожные магистрали и круглогодичные автомобильные дороги. Данный факт увеличивает фактическую стоимость дизельного топлива и комплектующих для автономных энергосистем Севера на 150–250 % со сроком доставки до 2,5 лет [5, 6].

В этой связи существует необходимость уменьшения объемов потребления дорогостоящего ди-

зельного топлива и доли изношенности ключевого генерирующего оборудования автономных энергосистем Севера. Данная проблема решается с помощью внедрения объектов возобновляемой энергетики. Под данными объектами подразумеваются ветровые (далее – ВЭС) и фотоэлектрические станции (далее – ФЭС), компенсирующие выработку дизельных электростанций (далее – ДЭС).

Выработка электроэнергии от ВЭС в значительной мере зависит от скорости и продолжительности ветра, температуры окружающей среды и влажности воздуха. Прогнозирование выработки ВЭС имеет значительные сложности по причине непостоянного характера движения воздушных потоков. Разрабатываются различные математические модели в том числе с применением нейронных сетей и машинного обучения для прогнозирования выработки электроэнергии от ВЭС, но не достигается необходимый уровень точности расчетов в соответствии с требованиями диспетчеризации энергосистем [7, 8].

Выработка электроэнергии от ФЭС в значительной мере зависит от солнечной инсоляции и интенсивности образования поверхностного загрязнения, а также от температуры окружающей среды. Прогнозирование выработки ФЭС имеет высокую точность при сопоставлении с фактическими показателями выработки при разнице не более 10 % [9, 10]. Наиболее доступными и массовыми лицензированными платформами прогнозирования работы объектов гелиоэнергетики являются «*Global Solar Atlas*», «*TRNSYS 18*» и «*Homer Energy*» [11–13].

Территория Северо-Востока России имеет определенные климатические особенности (внешние факторы), негативно влияющие на функционирование фотоэлектрических панелей (далее – ФЭП) ФЭС, таких как: фактическое отсутствие солнечного излучения в декабре–январе (эффект «полярных ночей»); значительный снеговой покров; суточные перепады температур окружающей среды от –15 до +2 °С в марте–апреле и октябре–ноябре, которые образуют обледенение на поверхности ФЭП; высокие температуры окружающей среды (+30...+39 °С) в летний период; загрязнение воздушной среды мелкодисперсными фракциями пыли [14–16].

В целях уклонения от риска негативного влияния вышеуказанных факторов на функционирование ФЭС разработаны различные способы по борьбе с ними: автоматизированные системы ориентации ФЭП на источник солнечного излучения (трекерная установка); автоматические и механизированные системы очистки панелей от поверхностного загрязнения; вертикальное размещение ФЭП в зимне-весенний период; гидропонное охлаждение поверхности ФЭП; системы концентрации солнечного излучения на поверхности ФЭП (линзы Френеля) и др. [17–19].

Наибольшее увеличение выработки электроэнергии от ФЭС наблюдается в случае применения автоматических трекерных установок (далее – АТУ). Данные установки увеличивают суточную выработку ФЭП на 40–58 % при сравнении с линейным размещением панелей [20, 21]. Однако данные установки имеют высокую капитальную стоимость – не менее 500 тыс. р. (5 620 \$) на 1 кВт установленной мощности ФЭС. В соответствии с результатами ранее выполненных исследований установлено, что на территории Севера АТУ не могут функционировать при температуре воздуха ниже –40 °С по причине замерзания гидравлической части сервоприводов [22]. При порывах ветра со скоростью 15...25 м/с АТУ приводится в исходное положение в целях предотвращения угрозы поломки несущей конструкции.

Существует второй вид трекерных установок – ручные (далее – РТУ). Сущность данных установок заключается в ручном ориентировании несущей конструкции ФЭП перпендикулярно на Солнце с помощью оператора ФЭС или дистанционно-управляемой системы электропривода. Предложено проведение натурных исследований по оценке применимости РТУ без применения дорогостоящих автоматизированных гидравлических элементов, электронного оборудования с возможностью эксплуатации в условиях экстремально низких температур.

### Объекты и методика исследования

На базе мобильного полигона в центральной части Республики Саха (Якутия) (далее – Якутия) проведены натурные исследования по оценке возможности применения РТУ для ФЭС микро-мощности. Исследования выполнены в течение летнего периода. Оценка эффективности РТУ для ФЭС производится посредством анализа ее средне-суточных показателей выработки электроэнергии и сопоставления с данными выработки АТУ и линейного размещения ФЭП.

По формуле (1) выполнена оценка суточной выработки электроэнергии от ФЭП до и после применения РТУ [5, 22]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{E}_{\text{тр}}^i = \int_0^{24} P_{\text{ФЭП,тр}}(t) dt; \\ \mathcal{E}_{\text{лин}}^i = \int_0^{24} P_{\text{ФЭП,лин}}(t) dt; \\ \Delta_{\text{эф}} = \frac{\sum_{i=0}^4 \int_0^{24} P_{\text{ФЭП,тр}}(t) dt}{\sum_{i=0}^4 \int_0^{24} P_{\text{ФЭП,лин}}(t) dt}; \\ 1 < \Delta_{\text{эф}} < 1,58, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}_{\text{тр}}^i$  – суточная выработка электроэнергии от ФЭП с РТУ, Вт·ч;  $\mathcal{E}_{\text{лин}}^i$  – суточная выработка электроэнергии от ФЭП на несущих конструкциях, Вт·ч;  $P_{\text{ФЭП.тр}}$  – установленная мощность ФЭП с трекером, Вт;  $P_{\text{ФЭП.лин}}$  – установленная мощность ФЭП без трекера, Вт;  $t$  – период мониторинга, ч.;  $\Delta_{\text{эф}}$  – относительное суточное увеличение выработки электроэнергии, о.е.

На выполняемые натурные исследования влияют следующие факторы: обязательное наличие безоблачной погоды; влияние погрешности измерительного оборудования и регистраторов; наличие порывов ветра, которые влияют на температуру поверхности ФЭП и текущую ориентацию самой панели; своевременность изменения ориентации ФЭП в зависимости от времени через каждые 30 минут, 45 минут, 1 час, 1,5 часа и 2 часа; др.

В ходе выполнения натурных исследований применен следующий перечень фото- и электротехнического оборудования: РТУ; две монокристаллические ФЭП с установленной мощностью по 15 Вт; контроллер заряда; аккумуляторная батарея; вспомогательная нагрузка; электронный регистратор; термодатчики; климатическая станция с функцией передачи данных.

В качестве РТУ применена простейшая конструкция, позволяющая в ручном порядке ориентировать ФЭП в перпендикулярное положение относительно Солнца. Внешний вид и схема конструкции представлены на рис. 1, 2.



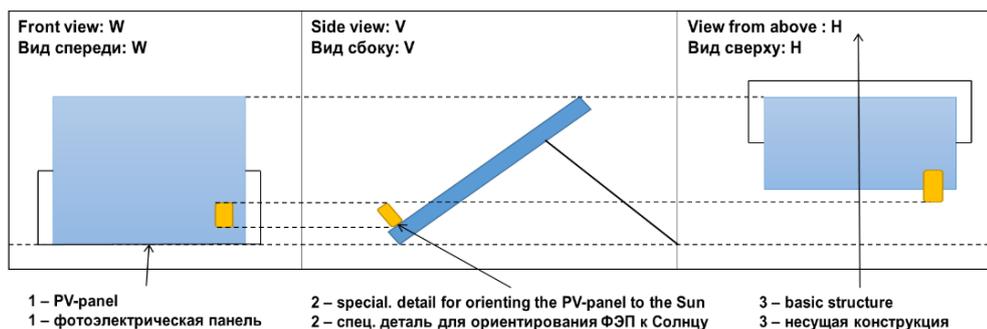
**Рис. 1.** Внешний вид ручной трекерной установки с панелью

**Fig. 1.** External view of the manual tracker installation with a PV-panel

Вышеуказанная схема РТУ с ФЭП имеет следующий цикл функционирования: в начале светового дня подготовить РТУ к работе; привести РТУ с ФЭП в перпендикулярное положение относительно Солнца; оптимальное положение ФЭП достигается посредством применения специальной детали; оптимальное положение обеспечивается только при отсутствии тени от специальной детали на поверхности ФЭП; производить изменение положения РТУ с ФЭП относительно Солнца с интервалом в ежечасном порядке; производить изменение положения РТУ с ФЭП относительно Солнца до конца светового дня.

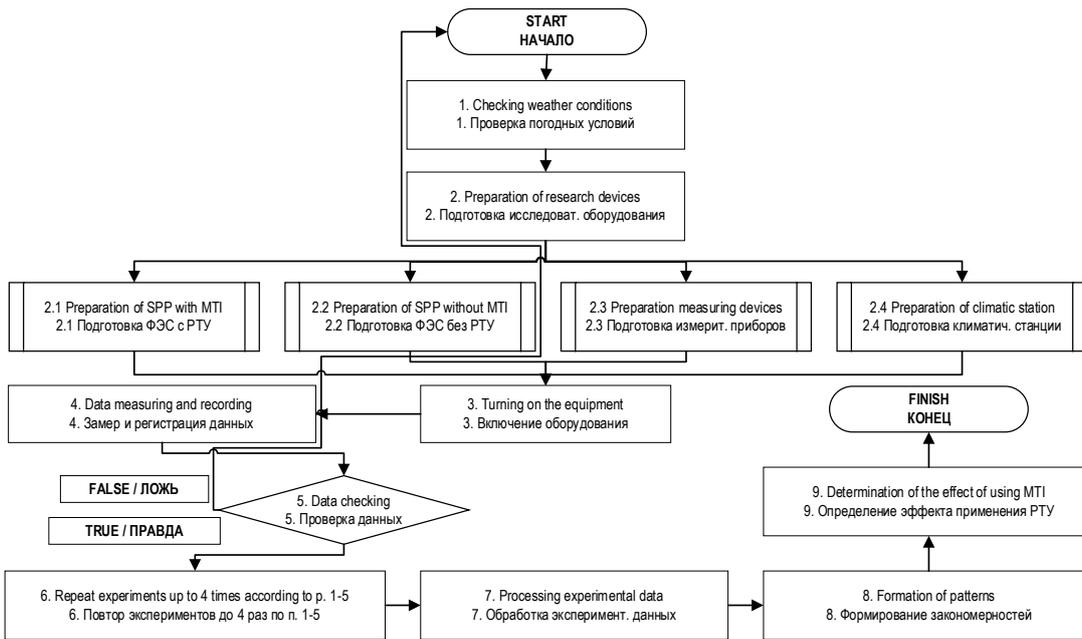
Разработан алгоритм выполнения натурных исследований (рис. 3), состоящий из следующих процедур: 1) проверка погодных условий – наличие безоблачной погоды; 2) подготовка полного перечня применяемого оборудования; 3) включение всего оборудования – изменение положения РТУ относительно Солнца с интервалом в 1 час; 4) выполнение контрольных замеров и регистрация данных с интервалом 5 минут; 5) проверка данных; 6) повтор экспериментов до 4 ед. по п. 1–5; 7) обработка экспериментальных данных; 8) построение графиков и идентификация закономерностей; 9) определение эффекта применения РТУ.

Интервал изменения положения РТУ через 1 час обосновывается следующим: наибольший эффект от применения РТУ достигается при постоянном изменении положения ФЭП к Солнцу – это применение АТУ; изменение положения через каждые 2–4 часа не приносит значительного эффекта и выработка электроэнергии от ФЭП (+1–10 %) практически тождественна к выработке при линейном (классическом) размещении ФЭП; изменение положения через каждые 30–45 минут имеет значительный эффект повышения выработки (+20–25 %), но данный интервал требует значительных трудозатрат, а именно выделения не менее одного оператора на ФЭС; изменение положения панелей через каждые 1–1,5 часа повышает выработку электроэнергии (+10–20 %) с минимальными трудозатратами. Данное наблюдение получено путем выполнения теоретических расчетов на общедоступной платформе «Global Solar Atlas».



**Рис. 2.** Схема конструкции ручной трекерной установки с панелью

**Fig. 2.** Manual tracker installation with PV-panel design diagram

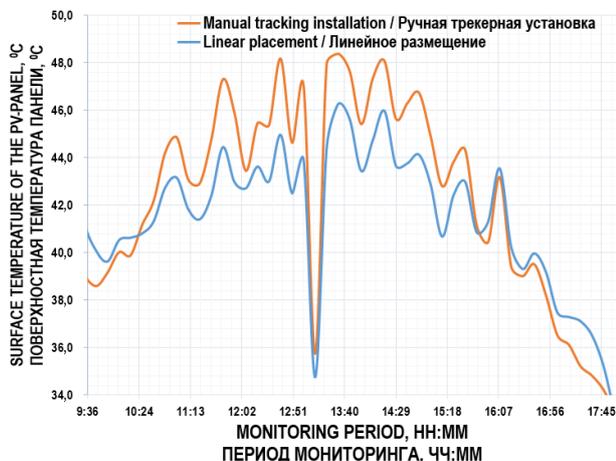


**Рис. 3.** Алгоритм выполнения натурных исследований  
**Fig. 3.** Algorithm for performing field studies

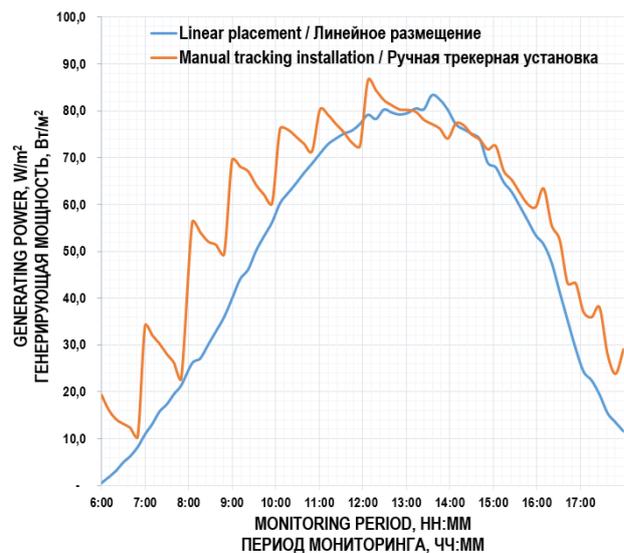
### Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 4–6 представлены суточные графики выработки электроэнергии от ФЭС с применением РТУ и линейным размещением ФЭП, а также график поверхностных температур на весь период выполнения натурных исследований.

На суточном графике выработки определено, что среднесуточная выработка электроэнергии от ФЭП на РТУ составила  $686,9 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ ; среднесуточная выработка электроэнергии от ФЭП без РТУ –  $584,4 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ ; в случае применения РТУ среднесуточная выработка ФЭС увеличивается на 17–18 % в течение летнего периода.



**Рис. 4.** Суточный график поверхностных температур фотovoltaических панелей  
**Fig. 4.** Daily graph of surface temperatures of PV-panels



**Рис. 5.** Суточный график выработки электроэнергии от ФЭС  
**Fig. 5.** Daily schedule of electricity generation from PV-power plant

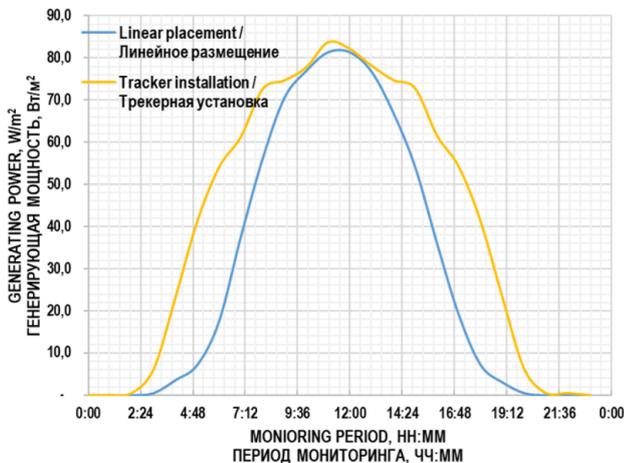
При линейном размещении ФЭП кривая генерирующей мощности имеет параболическую форму, имитирующую траекторию движения Солнца. Однако график выработки электроэнергии от ФЭП на РТУ является кривой в виде параболы, обращенной вниз, но с увеличением значения генерирующей мощности на период восхода и захода Солнца и в момент изменения ориентации ФЭП в перпендикулярное положение относительно Солнца. Вершины прерывания параболической формы кривой суточ-

ной выработки ФЭП на РТУ имеют повторность в 1 час ровно в момент изменения положения ФЭП. Таким образом, кривая выработки электроэнергии от ФЭП на РТУ напоминает кривую выработки панелей с АТУ, не имеющей вершины прерывания параболической кривой выработки электроэнергии.



**Рис. 6.** Внешний вид фотоэлектрических панелей во время натурных исследований  
**Fig. 6.** External views of PV-panels during field studies

В качестве примера на рис. 7 представлен суточный график выработки типовой ФЭС микро-мощности, где сопоставлены генерирующие мощности линейного размещения ФЭП и АТУ. Выполнена аналитическая оценка результатов натурных исследований, представленных в табл. 1.



**Рис. 7.** Суточный график выработки электроэнергии от типовой ФЭС  
**Fig. 7.** Daily schedule of electricity generation from a typical PV-power plant

На суточном графике поверхностных температур ФЭП видно, что: среднесуточная температура ФЭП на РТУ составила +42 °С; среднесуточная температура ФЭП без РТУ составила +41,6 °С; в случае применения РТУ скачкообразно увеличивается поверхностная температура ФЭП в момент изменения положения ФЭП; увеличение поверх-

ностной температуры ФЭП способствует появлению недоотпуска (технологических потерь) электроэнергии, в особенности при безоблачной погоде с температурой окружающей среды от +30 °С и выше.

**Таблица 1.** Результаты натурных исследований  
**Table 1.** Results of field studies

Параметр/Parameter	СИ Unit	Способ размещения Method of placement	
		РТУ/MTI	Линейное Linear
Среднесуточная генерирующая мощность ФЭП Average daily generating capacity of PV-panel	Вт/м <sup>2</sup> W/m <sup>2</sup>	57,2	48,7
Среднесуточная выработка ФЭП Average daily production of PV-panel	Вт·ч/м <sup>2</sup> W·h/m <sup>2</sup>	686,9	584,4
Среднесуточное увеличение выработки электроэнергии Average daily increase in electricity generation	%	+17,6	0,0
Диапазон температуры окружающей среды в течение проведения натурных исследований Ambient temperature range during field studies	°С	+20...+26	
Среднесуточная скорость ветра Average daily velocity	м/с m/s	0,0...1,0	
Среднесуточная поверхностная температура ФЭП Average daily surface temperature of PV-panel	°С	+42,0	+41,6
Максимальная поверхностная температура ФЭП Maximum surface temperature of PV-panel		+48,4	+46,3
Минимальная поверхностная температура ФЭП Minimum surface temperature of PV-panel		+33,2	+33,1
Среднесуточная поверхностная температура ФЭП Average daily surface temperature of PV-panel		+42,0	+41,6
Относительное увеличение среднесуточной поверхностной температуры Relative increase in average daily surface temperature	%	0,9...1,0	0,00

В соответствии с результатами обработки экспериментальных данных зафиксировано следующее: в ходе экспериментов наблюдается практически безветренная погода и в связи с этим фактором влияния ветра пренебрегают; в случае применения РТУ среднесуточная температура поверхности ФЭП увеличивается на 0,4 °С; минимальная температура поверхности ФЭП до и после применения РТУ практически не меняется – +33,1...+33,2 °С; в ходе эксперимента среднесуточная выработка ФЭП

после применения РТУ увеличилась на  $102,5 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ ; в ходе эксперимента среднесуточная генерирующая мощность ФЭП после применения РТУ увеличилась на  $8,5 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

По результатам натурных исследований установлено, что: среднесуточная выработка электроэнергии от ФЭП на РТУ выше на 17,61 %, чем при линейном размещении ФЭП; максимальная поверхностная температура ФЭП на РТУ составила  $+48,4 \text{ }^\circ\text{C}$ , а при линейном размещении –  $+46,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ; относительное увеличение температуры поверхности ФЭП при применении РТУ составило  $+0,9\dots+1,0 \text{ } \%$ . По причине непосредственного влияния энергии солнечного излучения поверхностная температура ФЭП на РТУ увеличилась на  $22,4\text{--}28,4 \text{ }^\circ\text{C}$ , а при линейном размещении – на  $20,3\text{--}26,3 \text{ }^\circ\text{C}$ . В связи с этим по причине применения РТУ зафиксировано увеличение поверхностной температуры ФЭП на  $2,1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Из-за низкой скорости ветра влиянием данного фактора на поверхностную температуру ФЭП пренебрегли.

По результатам проведенных натурных исследований с применением РТУ определены следующие рекомендации для их устойчивой эксплуатации:

1. РТУ следует разрабатывать и проектировать в зависимости от установленной мощности ФЭС.
2. РТУ должна представлять собой механическую конструкцию без применения гидравлических элементов для обеспечения возможности ее эксплуатации в условиях экстремально низких температур.
3. РТУ должна иметь прочную конструкцию, выдерживающую порывы ветра со скоростью до  $15\text{--}20 \text{ м}/\text{с}$ , и иметь облегченную систему блокировки конструкции после периодического изменения ориентации/положения ФЭП к Солнцу.
4. Специальную деталь для ориентирования ФЭП следует прочно прикрепить на нижние панели вне их фотоэлементов. Деталь должна иметь длину не менее  $0,15 \text{ м}$  и состоять из полимерного материала малой плотности ( $\approx 850 \text{ кг}/\text{м}^3$ ), которую можно легко приклеить на металлические, стеклянные и деревянные поверхности.
5. В случае применения нескольких РТУ в ФЭС их следует разместить в одну линию с обязательным наличием единой механической двухосевой системы ориентирования к Солнцу.

На базе лицензированных платформ «*Global Solar Atlas*» и «*MC Office Excel*» проведены имитационные вычисления по идентификации параметров технико-экономической оценки применимости РТУ в типовую ФЭС микро-мощности с линейным способом размещения ФЭП на территории Якутии.

В качестве объекта имитационных вычислений выбрана автономная энергосистема в с. Тойон-Арыы, в которой функционируют ДЭС установленной мощностью  $190 \text{ кВт}$  и ФЭС –  $20 \text{ кВт}$ .

Сущность технико-экономической оценки заключается в сопоставлении параметров функционирования ФЭС при трех возможных способах размещения ФЭП: 1 – РТУ; 2 – линейное (классическое); 3 – АТУ. Результаты данной оценки представлены в табл. 2. Технико-экономическая оценка применимости РТУ выполнена в российских рублях.

Окупаемость объектов гелиоэнергетики на изолированных территориях Севера заключается в уменьшении потребления дорогостоящего топлива в объектах автономной генерации – ДЭС. Известно, что суммарная стоимость годового расхода топлива в фото-дизельной электростанции (далее – ФДЭС) напрямую зависит от следующих параметров: удельной стоимости дизельного топлива (тыс. р./т); среднегодового удельного расхода дизельного топлива в ДЭС (гр./кВт·ч); годовой выработки электроэнергии от ДЭС (кВт·ч). В случае применения ФДЭС выработка электроэнергии от ДЭС уменьшается путем ее компенсации за счет выработки ФЭС, что и снижает годовой объем потребления топлива.

Стоит отметить, что показатели выработки электроэнергии от рассматриваемой ФЭС с линейным способом размещения являются фактическими по состоянию на конец 2023 г. Показатели выработки электроэнергии от ФЭС с применением РТУ или АТУ определены путем непосредственного произведения выработки от линейного размещения ФЭП на коэффициент, описывающий долю увеличения выработки после применения данных установок, –  $1,176 \text{ о.е.}$  и  $1,482 \text{ о.е.}$  соответственно.

По результатам технико-экономической оценки установлено: наибольшая выработка электроэнергии достигается от АТУ – более  $31 \text{ тыс. кВт}\cdot\text{ч}$ ; АТУ имеет наибольшую капитальную стоимость, которая выше в  $2\text{--}2,5$  раза при сравнении с линейным размещением ФЭП или РТУ; операционные затраты РТУ незначительно меньше от АТУ по причине необходимости наличия только одного оператора; в случае применения РТУ срок окупаемости ФЭС составил  $11,7$  лет, а в случае внедрения АТУ –  $22,3$  года; РТУ может функционировать в условиях экстремально низких температур по причине отсутствия сервоприводов с гидравлическими элементами; достигнута относительная углеродная нейтральность автономной энергосистемы – снижение объемов выброса  $\text{CO}_2$  на  $11,7$ ,  $7,2$  и  $22,3 \text{ т}$  для РТУ, линейного размещения ФЭП и АТУ соответственно.

**Таблица 2.** Результаты технико-экономической оценки применения ручной трекерной установки

**Table 2.** Results of the technical and economic assessment of the use of a manual tracking installation

Параметр Parameter	СИ Unit	Способ размещения ФЭП Method of PV-panel placement		
		РТУ/MTI	Линейный/Linear	АТУ/ATI
Установленная мощность ФЭС/Installed capacity of PV-power plant	кВт/kW	20		
Удельная стоимость ФЭС/Specific cost of PV-power plant	тыс. р./кВт/10 <sup>3</sup> ₹/kW	300,0	250,0	750,0
Капитальная стоимость ФЭС/Capital cost of PV-power plant	тыс. р./10 <sup>3</sup> ₹	6000,0	5000,0	15000,0
Годовые операционные затраты/Annual operating costs		543,3	200,0	650,0
Годовая выработка э/э от ФЭС Annual power generation from PV-power plant	кВт·ч/kW·h	25043,2	21193,4	31416,8
Удельная себестоимость э/э от ФЭС Specific cost of electricity from PV-power plant	р./кВт·ч/₹/kW·h	33,0	18,79	41,4
Среднегодовой удельный расход топлива в дизельной ЭС Average annual specific fuel consumption in diesel power plants	гр./кВт·ч/gr./ kW·h	350,9		
Фактическая стоимость топлива/Actual cost of fuel	тыс. р./т/10 <sup>3</sup> ₹/t	120,0		
Годовая экономия топлива/Annual fuel savings	т/t	8,8	7,5	11,0
Годовая удел. экономия топлива/Annual specific fuel economy	т/кВт/т/kW	0,44	0,37	0,55
Годовая экономия топлива/Annual fuel economy	тыс. р./10 <sup>3</sup> ₹	1 054,5	896,6	1 322,9
Годовое снижение выбросов CO <sub>2</sub> /Annual reduction in CO <sub>2</sub> emissions	тн. CO <sub>2</sub> /t. CO <sub>2</sub>	27,7	23,5	34,7
Срок окупаемости/Payback period	лет/year	11,7	7,2	22,3
Площадь размещения ФЭП в ФЭС Area of placement of PV-panels in PV-power plants	м <sup>2</sup>	300	476	300

В связи с этим рекомендуется применение РТУ или линейное размещение ФЭП по причине относительно малого срока окупаемости и низких капитальных и операционных затрат. В случае необходимости экономии значительного количества топлива и достижения значительной углеродной нейтральности рекомендуется применение АТУ в ФЭС при наличии государственного субсидирования.

Также использование РТУ для ФЭС микро-мощности (до 20 кВт) обосновывается результатами натуральных исследований и технико-экономической оценки, а именно: относительно быстрый срок окупаемости – до 12,0 лет; увеличение выработки электроэнергии на 17,6 % при сравнении с линейным размещением ФЭП; увеличение годовой экономии топлива; снижение выбросов CO<sub>2</sub>; снижение площади размещения ФЭП в ФЭС на 37 %.

Однако применение РТУ в ФЭС установленной мощностью более 20 кВт не рекомендуется по следующим причинам: необходимость увеличения количества РТУ на значительное количество ФЭП; повышение трудовых затрат, так как требуется ежечасное изменение положения РТУ с ФЭП с привлечением уже нескольких операторов; возможность применения АТУ в ФЭС установленной мощностью более 20 кВт со значительным увеличением среднесуточной выработки в весенне-летний период (+40–58 %). Однако АТУ практически не окупаются в ФЭС установленной мощностью до 20 кВт, где их срок окупаемости составил 22,3 лет. Известно, что средний срок службы АТУ составляет 15–20 лет.

В табл. 2 видно, что по себестоимости электроэнергии от ФЭС наименее затратным является линейное размещение ФЭП – 18,79 р./кВт·ч при сравнении с РТУ – 33,0 р./кВт·ч и АТУ – 41,4 р./кВт·ч. Следовательно, формируется предположение, что вместо применения РТУ или АТУ можно просто увеличить установленную мощность ФЭС при линейном размещении ФЭП.

В целях получения аналогичной годовой выработки электроэнергии при применении РТУ или АТУ необходимо увеличение установленной мощности ФЭС при линейном размещении ФЭП на 18,1 и 48 %, соответственно, что увеличивает капитальную стоимость данного ФЭС – 5 905,0 и 7 400 тыс. р., соответственно. Увеличение капитальной стоимости ФЭС с линейным размещением ФЭП приводит к повышению ее срока окупаемости и площади размещения ФЭП в 1,18–1,48 раза в зависимости от замещения РТУ или АТУ. Таким образом, сущность применения трекерных систем в объектах гелиоэнергетики заключается в увеличении выработки электроэнергии, повышении доли экономии топлива в автономных энергосистемах с ДЭС и ФЭС, снижении необходимой площади размещения ФЭС и объемов выбросов CO<sub>2</sub>. Однако эксплуатация двух видов трекерных систем отличается в следующем: применение РТУ только для ФЭС с установленной мощностью до 20 кВт; АТУ только для ФЭС с установленной мощностью более 20 кВт.

Выполнена оценка надежности функционирования типовой автономной энергосистемы в с. Тойон-Ары (центральная часть Якутии). Генерирующие элементы рассматриваемой автономной энергосистемы представлены в виде трех вариантов (рис. 8): Ва-

риант 1 (ДЭС); Вариант 2 (ДЭС+ФЭС); Вариант 3 (ДЭС+ФЭС+РТУ); Вариант 4 (ДЭС+ФЭС+АТУ). Результаты оценки надежности функционирования типовой автономной энергосистемы представлены в табл. 3.

Оценка технической и оперативной надежности рассматриваемой автономной энергосистемы установила следующее:

- общий недоотпуск электроэнергии в значительной мере снижается с 2,72 до 2,25 % только в случае применения АТУ в ФЭС. Данная тенденция объясняется повышенной выработкой электроэнергии при сравнении с другими способами размещения ФЭП (табл. 2, п. 5);
- практически не меняется коэффициент готовности во всех вариантах комплектации по причине увеличения количества генерирующих элементов (новая ФЭС установленной мощностью 20 кВт) в рассматриваемой энергосистеме;
- наименьшая вероятность отказов достигается в случае линейного размещения ФЭП или РТУ в ФЭС. Данная тенденция обосновывается отсутствием электронных и гидравлических элементов, а также возможностью функционирования при значительных порывах ветра и экстремаль-

но низких температурах окружающей среды в предложенных способах размещения панелей (линейное размещение и РТУ). Эксплуатация АТУ ограничена в декабре–январе по причине снижения температуры окружающей среды менее  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а также необходимостью останова установки при порывах ветра от 15 м/с и более. При температуре ниже  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  гидравлическая часть сервоприводов АТУ замерзает;

- исходя от результатов оценки надежности энергосистемы, рекомендуется линейное размещение ФЭП или применение РТУ, но, как правило, для объектов микро-мощности (не более 20 кВт). В ФЭС мощностью более 20 кВт рекомендуется применение АТУ.

### Заключение

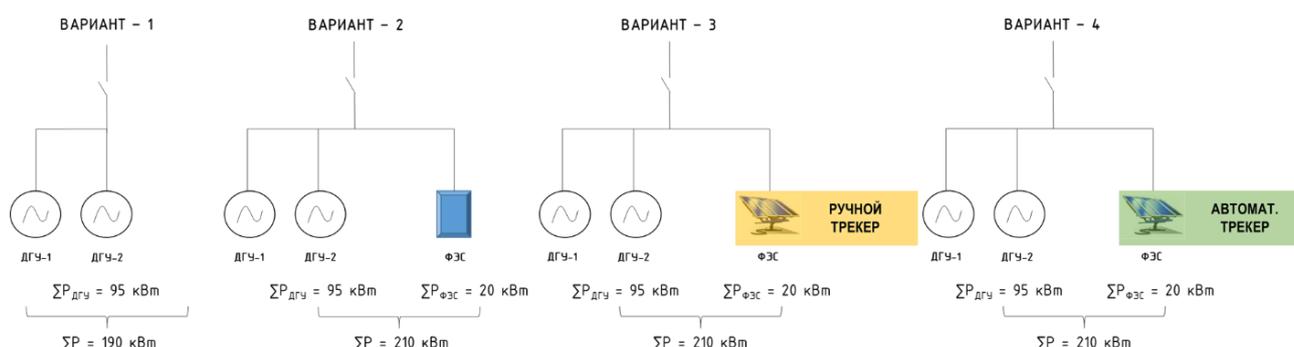
На основании вышеизложенного по результатам проведенного исследования получены следующие результаты:

1. Произведена попытка обоснования применимости концепции ручных трекерных установок в фотоэлектрических станциях микро-мощности, функционирующих в составе автономных энергосистем Севера.

**Таблица 3.** Оценка надежности функционирования автономной энергосистемы

**Table 3.** Evaluation of the reliability of the autonomous power system

Параметр Parameter	Варианты комплектации энергосистемы Energy system configuration options			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
	ДЭС DPP	ДЭС – ФЭС DPP – SPP	ДЭС – ФЭС – РТУ DPP – SPP – MTI	ДЭС – ФЭС – АТУ DPP – SPP – ATI
Недоотпуск электроэнергии, % Undersupply of electricity, %	2,72	2,36	2,32	2,25
Коэффициент готовности, о.е. Availability factor, o.u.	0,95	0,95	0,95	0,95
Вероятность отказов, о.е. Probability of failure, o.u.	0,50	0,33	0,33	0,40
Вероятность безотказной работы, о.е. Probability of failure-free operation, o.e.	0,50	0,67	0,67	0,60



**Рис. 8.** Варианты комплектации рассматриваемой автономной энергосистемы  
**Fig. 8.** Options for completing the autonomous power system under consideration

2. В случае отсутствия активного софинансирования проектов гелиоэнергетики со стороны государства не рекомендуется применение автоматических трекерных установок по причине их высокой капитальной стоимости (5620\$ на 1 кВт установленной мощности), а также в связи с невозможностью эксплуатации при температуре окружающей среды от  $-40^{\circ}\text{C}$  и ниже, при порывах ветрах со скоростью 15–25 м/с или при значительной облачности.
3. Разработан алгоритм выполнения натурных исследований по определению эффекта применения ручных трекерных установок для фотоэлектрических станций, учитывающий ключевые требования теории планирования экспериментальных исследований.
4. На территории центральной части Республики Саха (Якутия) в течение летнего сезона проведен ряд натурных исследований по идентификации применимости ручных трекерных установок для фотоэлектрических панелей с использованием определенного перечня научно-исследовательского оборудования.
5. Проведенные исследования показали: среднесуточная выработка электроэнергии от фотоэлектрических панелей на ручных трекерных установках выше на 17,61 % при сравнении с линейным (классическим) размещением панелей; среднесуточная поверхностная температура фотоэлектрических панелей на ручных трекерных установках выше на 0,9–1,0 % при сравнении с линейным размещением панелей.
6. Выполнена технико-экономическая оценка эффекта применения данных установок на базе типовой автономной энергосистемы в с. Тойон-Ары (центральная часть Якутии), где установлено, что: удельная себестоимость электроэнергии от фотоэлектрической станции с ручным трекером составила 33,01 р./кВт·ч, с автоматическим трекером – 41,4 р./кВт·ч, без трекеров – 18,8 р./кВт·ч; стандартный срок окупаемости фотоэлектрической станции с ручными трекерами составил 11,7 лет, при линейном размещении панелей – 7,2 лет, с автоматическими трекерами – 22,3 года; удельная годовая экономия топлива с применением ручных трекеров – 0,44 т/кВт, с линейным размещением – 0,37 т/кВт, с автоматическими трекерами – 0,55 т/кВт; удельное снижение выбросов  $\text{CO}_2$  с применением ручных трекеров – 1,38 т/год; удельное снижение выбросов  $\text{CO}_2$  с применением линейного размещения ФЭП – 1,18 т/год; удельное снижение выбросов  $\text{CO}_2$  с применением автоматических трекеров – 1,74 т/год.
7. Выполнена оценка надежности типовой автономной энергосистемы в с. Тойон-Ары (центральная часть Якутии). По итогам данной оценки рекомендовано применение линейного размещения фотоэлектрических панелей или ручных трекерных установок в фотоэлектрических станциях микро-мощности. Данный результат обосновывается снижением общего недоотпуска электроэнергии в энергосистеме с 2,72 до 2,32–2,36 % и уменьшением вероятности отказов с 0,50 до 0,33 о.е.
8. В случае отсутствия софинансирования проектов гелиоэнергетики со стороны государства рекомендовано применение ручных трекерных установок и линейное размещение ФЭП для фотоэлектрических станций микро-мощности вследствие относительно быстрого срока окупаемости и малых финансовых затрат. В связи с этим ручные трекеры можно использовать для малобюджетных проектов в области гелиоэнергетики.
9. Применение автоматических трекерных установок в объектах гелиоэнергетики возможно в случае необходимости достижения экономии значительного количества топлива и значительной углеродной нейтральности при наличии крупных денежных инвестиций со стороны инвестора или государства.  
Дальнейшие исследования будут направлены на изучение возможности разработки ручных трекерных установок с управляемым электроприводом для фотоэлектрических станций микро-мощности при минимальном привлечении человеческого ресурса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Karamov D.N. Autonomous renewable energy systems in Russia. Critical review of the current situation // *Energy Reports*. – 2020. – Vol. 6. – P. 31–37.
2. Ivanova I.Y., Komeev A.G., Tuguzova T.F. Assessment of feasible power supply options for new projects in the Arctic Zone of the Republic of Sakha (Yakutia) // *IEEE*. – 2019. – P. 1–5.
3. Ivanova I., Pasechnikov T. Experience of solar-diesel power plant introduction in the village of Nerkha of the Irkutsk region // *E3S Web of conferences*. – 2019. – Vol. 77. DOI: 10.1051/e3sconf/20197704004.
4. Tuguzova. T. Study of the effect of natural factors on optimal capacity of renewable energy resources // *E3S Web of Conferences*. – 2019. – Vol. 77. – P. 7.
5. Mestnikov N., Hassan F.A., Alzakkar A.M-N. Study of operation of combined power supply system based on renewable energy in territory of Far east of Russia // *IEEE*. – 2021. – P. 114–118. DOI: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896264.
6. Karamov D.N., Naumov I.V. Modeling a solar power plant with regard to changes in environmental parameters // *Power Technology and Engineering*. – 2020. – Vol. 54. – № 4. – P. 548–554.

7. Study to evaluate the effect of terrain surface on performance of a wind farm in Ninh Thuan province, Vietnam / V.T. Dinh, H.D. Nguyen, S. Le Quang, V.B. Doan // *E3S Web of Conferences*. – 2023. – Vol. 470. – P. 11.
8. Evaluation of the impact of adjusting the angle of the axis of a wind turbine rotor relative to the flow of air stream on operating parameters of a wind turbine model / S. Gumula, M. Piaskowska-Silarska, K. Pytel, H. Noga, W. Kulinowski // *Energy and Fuels*. – 2017. – Vol. 14. – P. 10.
9. Nowcasting the output power of PV systems / M. Paulescu, O. Mares, C. Dughir, E. Paulescu // *International Conference on Renewable Energy E3S Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 61. – P. 6.
10. Saad E., Elkoteshy Ya., AbouZayed U. Modelling and analysis of grid-connected solar-PV system through current-mode controlled VSC // *E3S Web of Conferences*. – 2020. – Vol. 167. – P. 5.
11. Mehrad. M.T. Assessment of solar energy potential and development in Afghanistan // *E3S Web of Conferences*. – 2021. – Vol. 239. – P. 12.
12. Rakhmonov I.U., Reymov K.M. Statistical models of renewable energy intermittency // *E3S Web of Conferences*. – 2020. – Vol. 216. – P. 5.
13. Analysis of solar district cooling systems: the effect of heat rejection / G. Brumana, G. Franchini, E. Ghirardi, A. Perdichizzi // *E3S Web of Conferences*. – 2020. – Vol. 197. – P. 12.
14. Nesterova N., Makarieva O., Zemlyanskova A. Hydrometeorological changes in the North-East of Russia // *E3S Web of Conferences*. – 2020. – Vol. 163. – P. 5.
15. Marchenko O., Solomin S. Efficiency of solar and wind energy use in the countries of Central and North-East Asia // *E3S Web of Conferences*. – 2020. – Vol. 209. – P. 7.
16. Shpanev A., Smuk V. Contribution of weather conditions and anthropogenic activity to the variation of grain yields in the North-West of Russia // *E3S Web of Conferences*. – 2023. – Vol. 431. – P. 5.
17. Singarapu S., Swaraja K., Kirola M. Smart Internet of Things based solar panel cleaning system // *E3S Web of Conferences*. – 2023. – Vol. 430. – P. 9.
18. Uyun A.S., Setiawan M.I., Burlakovs Ju. Portable and customizable solar panel cleaner design // *E3S Web of Conferences*. – 2023. – Vol. 432. – P. 9.
19. Rizescu D., Rizescu C.I., Alionte C.G. Researches on the development of an optical system for improving the efficiency of photovoltaic panels // *E3S Web of Conferences*. – 2020. – Vol. 180. – P. 6.
20. Mitrofanov. S.V., Baykassenov D.K., Nemaltsev A.U. Operational experience of a solar power plant with a dual-axis solar tracking system in the conditions of the Southern Urals // *E3S Web of Conferences*. – 2019. – Vol. 124. – P. 5.
21. Design and prototyping of dual axis solar tracking system for performance enhancement of solar photo-voltaic power plant / A. Patil, M. Dhavalikar, S. Dingare, V. Bhojwani // *E3S Web of Conferences*. – 2020. – Vol. 170. – P. 7.
22. Оценка эффективности внедрения трекерных установок в солнечные электростанции в условиях Севера / Н.П. Местников, А.К. Корякин, П.Ф. Васильев, А.М-Н. // *Альзаккар Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ: НИУ МЭИ*. – 2023. – № 6. – С. 67–76.

### Информация об авторах

**Николай Петрович Местников**, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения Физико-технического института Северо-Восточного федерального университета, Россия, 677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58; ведущий инженер отдела электроэнергетики Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова, Якутский научный центр СО РАН, Россия, 677027, г. Якутск, ул. Октябрьская 1, sakhasase@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7090-4839>

**Вадим Зиновьевич Манусов**, доктор технических наук, профессор кафедры систем электроснабжения предприятий факультета энергетики Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, manusov36@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7799-4830>

**Павел Филиппович Васильев**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела электроэнергетики Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова, Якутский научный центр СО РАН, Россия, 677027, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1, kb-8@mail.ru

Поступила в редакцию: 21.06.2024

Поступила после рецензирования: 01.07.2024

Принята к публикации: 08.04.2025

### REFERENCES

1. Karamov D.N. Autonomous renewable energy systems in Russia. Critical review of the current situation. *Energy Reports*, 2020, vol. 6, pp. 31–37.
2. Ivanova I.Y., Korneev A.G., Tuguzova T.F. Assessment of feasible power supply options for new projects in the Arctic Zone of the Republic of Sakha (Yakutia). *IEEE*, 2019, pp. 1–5.
3. Ivanova I., Pasechnikov T. Experience of solar-diesel power plant introduction in the village of Nerka of the Irkutsk region. *E3S Web of conferences*, 2019, vol. 77. DOI: 10.1051/e3sconf/20197704004.
4. Tuguzova T. Study of the effect of natural factors on optimal capacity of renewable energy resources. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 77, p. 7.
5. Mestnikov N., Hassan F.A., Alzakkar A.M-N. Study of operation of combined power supply system based on renewable energy in territory of Far east of Russia. *IEEE*, 2021, pp. 114–118.

6. Karamov D.N., Naumov I.V. Modeling a solar power plant with regard to changes in environmental parameters. *Power Technology and Engineering*, 2020, vol. 54, no. 4, pp. 548–554.
7. Dinh V.T., Nguyen H.D., Le Quang S., Doan V.B. Study to evaluate the effect of terrain surface on performance of a wind farm in Ninh Thuan province, Vietnam. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 470, p. 11.
8. Gumuła S., Piaskowska-Silarska M., Pytel K., Noga H., Kulinowski W. Evaluation of the impact of adjusting the angle of the axis of a wind turbine rotor relative to the flow of air stream on operating parameters of a wind turbine model. *Energy and Fuels*, 2017, vol. 14, p. 10.
9. Paulescu M., Mares O., Dughir C., Paulescu E. Nowcasting the output power of PV systems. *International Conference on Renewable Energy E3S Web of Conferences*, 2018, vol. 61, p. 6.
10. Saad E., Elkoteshy Ya., AbouZayed U. Modelling and analysis of grid-connected solar-PV system through current-mode controlled VSC. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 167, p. 5.
11. Mehrad. M.T. Assessment of solar energy potential and development in Afghanistan. *E3S Web of Conferences*, 2021, vol. 239, p. 12.
12. Rakhmonov I.U., Reymov K.M. Statistical models of renewable energy intermittency. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 216, p. 5.
13. Brumana G., Franchini G., Ghirardi E., Perdichizzi A. Analysis of solar district cooling systems: the effect of heat rejection. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 197, p. 12.
14. Nesterova N., Makarieva O., Zemlyanskova A. Hydrometeorological changes in the North-East of Russia. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 163, p. 5.
15. Marchenko O., Solomin S. Efficiency of solar and wind energy use in the countries of Central and North-East Asia. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 209, p. 7.
16. Shpanev A., Smuk V. Contribution of weather conditions and anthropogenic activity to the variation of grain yields in the North-West of Russia. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 431, p. 5.
17. Singarapu S., Swaraja K., Kirola M. Smart Internet of Things based solar panel cleaning system. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 430, p. 9.
18. Uyun A.S., Setiawan M.I., Burlakovs Ju. Portable and customizable solar panel cleaner design. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 432, p. 9.
19. Rizescu D., Rizescu C.I., Alionte C.G. Researches on the development of an optical system for improving the efficiency of photovoltaic panels. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 180, p. 6.
20. Mitrofanov. S.V., Baykasenov D.K., Nemaltsev A.U. Operational experience of a Solar Power Plant with a Dual-Axis Solar Tracking System in the conditions of the Southern Urals. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 124, p. 5.
21. Patil A., Dhavalikar M., Dingare S., Bhojwani V. Design and prototyping of dual axis solar tracking system for performance enhancement of solar photo-voltaic power plant. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 170, p. 7.
22. Mestnikov N.P., Koryakin A.K., Vasiliev P.F., Alzakkar A.M-N. Evaluation of the efficiency of introducing tracker installations into solar power plants in the Northern conditions. *Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute*, 2023, no. 6, pp. 67–76. (In Russ.)

### Information about the authors

**Nikolay P. Mestnikov**, Cand. Sc., Associate Professor, North-Eastern Federal University, 58, Belinsky street, Yakutsk, 677000, Russian Federation; Leading Engineer, Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North of the Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Oktyabrskaya street, Yakutsk, 677027, Russian Federation. sakhacase@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7090-4839>

**Vadim Z. Manusov**, Dr. Sc., Professor, Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation. manusov36@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7799-4830>

**Pavel F. Vasilyev**, Cand. Sc., Leading Researcher, Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Oktyabrskaya street, Yakutsk, 677027, Russian Federation. kb-8@mail.ru

Received: 21.06.2024

Revised: 01.07.2024

Accepted: 08.04.2025