

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 620.91

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-81-91>

Исследование функционирования фотоэлектрической установки в условиях облачной погоды на территории Севера

Николай Петрович Местников^{1,2✉}, Павел Филиппович Васильев^{1,2},
Геннадий Иванович Давыдов², Александр Михайлович Хоютанов²,
Ахмад Мухаммед-Насер Альзаккар³

¹Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, г. Якутск, Россия

²Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск, Россия

³Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

¹sakhacase@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7090-4839>

²kb-8@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4108-176X>

³dav_gen@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8543-0867>

⁴shuriklater@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1917-6976>

⁵ahmadalzakkar86@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8355-189X>

Резюме. Цель – определение влияния различных видов облачности на функционирование фотоэлектрической установки на территории центральной части Республики Саха (Якутия). В работе использован метод определения электроэнергетической эффективности фотоэлектрической установки при различных видах облачности с приведением графических интерпретаций, с применением различных измерительных и регистрирующих устройств и описанием порядка проведения экспериментальных работ. Используются закономерности определения среднестатистических показателей снижения электроэнергетической эффективности фотоэлектрической установки для определенного вида облачности. Конкретный вид облачности идентифицирован посредством проведения замеров и вычисления диапазонов освещенности при учете граничных условий. Данные исследования проведены в течение летнего периода 2021 года на базе мобильного полигона ИФТПС им. В. П. Ларионова СО РАН на территории центральной части Республики Саха (Якутия). Получены контрольные параметры изменения величины генерирующей мощности фотоэлектрической установки для 10 видов облачности, которые могут применяться при моделировании эксплуатационных процессов и инженерных расчетах режимов работы солнечных электростанций. Установлено, что в случае эксплуатации фотоэлектрических установок при различных видах облачности снижение генерирующей мощности установки варьируется в пределах 8–95% относительно показателя генерирующей мощности при безоблачной погоде. Полученные показатели изменения генерирующей мощности фотоэлектрической установки при различных видах облачности могут быть применены при разработке методики по оценке влияния облачности и ее видов на пропускную способность солнечных лучей, падающих на поверхность фотоэлектрических панелей, для более точного определения энергетического потенциала солнечной генерации в определенной местности.

Ключевые слова: фотоэлектрическая установка, мониторинг работы, облачность, генерирующая мощность, электроэнергетическая эффективность

Благодарности: Результаты исследований, описанные в настоящей статье, подготовлены в рамках выполнения государственного задания на проект «Исследования путей повышения эксплуатационной надежности и эффективности интеллектуальных электроэнергетических систем в условиях Севера и Арктики» ФНИ в РФ на 2021–2030 гг. по приоритетному направлению «Основы эффективного развития и функционирования энергетических систем на новой технологической основе в условиях глобализации, включая проблемы энергобезопасности, энергосбережения и рационального освоения природных энергоресурсов».

Для цитирования: Местников Н. П., Васильев П. Ф., Давыдов Г. И., Хоютанов А. М., Альзаккар А. М.-Н. Исследование функционирования фотоэлектрической установки в условиях облачной погоды на территории Севера // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 1. С. 81–91. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-81-91>.

POWER ENGINEERING

Original article

Operation of a photovoltaic installation in the North under various cloudiness conditions

Nikolay P. Mestnikov^{1,2✉}, Pavel F. Vasilyev^{1,2}, Gennadiy I. Davydov²,
Aleksandr M. Khoyutanov², Ahmad M.-N. Alzakkar³

¹North-Eastern Federal University in Yakutsk,

²Institute of Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

³Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

¹sakhacase@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7090-4839>

²kb-8@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4108-176X>

³dav_gen@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8543-0867>

⁴shuriklater@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1917-6976>

⁵ahmadalzakkar86@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8355-189X>

Abstract. This study investigates the effect produced by various types of cloudiness on the functioning of a photovoltaic system in the central part of the Republic of Sakha (Yakutia). The electric power efficiency of the photovoltaic system under various cloudiness conditions was assessed using graphical interpretations, measuring and recording devices, as well as a description of the procedure for conducting experimental work. The average indicators of a decrease in the electric power efficiency of the photovoltaic system were determined using patterns for a certain type of cloudiness. A specific cloudiness type was identified by performing measurements and calculating illumination ranges, taking boundary conditions into account. These studies were carried out during the summer period of 2021 using the facilities of the mobile test site of the V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences located in the central part of the Republic of Sakha (Yakutia). Control parameters of alterations in the generating capacity of the photovoltaic system were obtained for 10 types of cloudiness. The obtained parameters can be used when modeling operational processes and performing engineering calculations of the operating modes for solar power plants. According to the results, during the operation of photovoltaic systems under various types of cloudiness, the decrease in the generating capacity of the installation can vary within 8–95% relative to the generating capacity indicator under clear weather. The obtained indicators of alterations in the generating capacity of a photovoltaic system under various cloudiness conditions can be applied for developing a methodology for assessing the effect of cloudiness and its types on the carrying capacity of solar beams falling on the photovoltaic panel surface, as well as to more accurately determine the energy potential of solar generation in a certain area.

Keywords: photoelectric unit, operation monitoring, cloud cover, generating capacity, power efficiency

Acknowledgements: The research results described in the article were prepared as a part of the state assignment for the project "Research on ways to improve the operational reliability and efficiency of intelligent electric power systems in the North and the Arctic" of the Fundamental Scientific Research in the Russian Federation for the period from 2021 till 2030 in the priority direction "Fundamentals of the effective development and operation of energy systems on a new technological basis in the conditions of globalization including the problems of energy security, energy conservation and rational development of natural energy resources".

For citation: Mestnikov N. P., Vasilyev P. F., Davydov G. I., Khoyutanov A. M., Alzakkar A. M.-N. Operation of a photovoltaic installation in the North under various cloudiness conditions. *iPolytech Journal*. 2022;26(1):81-91. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-81-91>.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие солнечной энергетики имеет большое значение для электроэнергетических систем множества стран. По данным Европейской ассоциации солнечной энергетики, на 2020 г. суммарная выработка электроэнергии от солнечных электростанций составляет порядка 2,6% [1]. Основной целью эксплуатации солнечных электростанций яв-

ляется снижение выбросов вредных веществ вследствие сгорания топлива, в том числе CO₂, в рамках функционирования централизованных электроэнергетических систем и экономии дорогостоящего топлива для автономных энергетических систем, в особенности в удаленных и труднодоступных зонах Севера и Арктики.

В автономных электроэнергетических си-

стемах преимущественно применяются традиционные источники энергии, которые функционируют посредством сгорания различных видов топлива. К примеру, в северных районах Дальнего Востока активно эксплуатируются автоматизированные дизель-генераторные и газотурбинные установки.

Объекты генерации электроэнергии в автономных электроэнергетических системах вследствие сгорания топлива значительно повышают выбросы CO₂ в атмосферу, где на 1 т дизельного топлива приходится 2,172 т CO₂.

По Северному энергетическому району Республики Саха (Якутия) за 2020 г. израсходовано более 64 тыс. т дизельного топлива, что эквивалентно 139 тыс. т CO₂. Кроме того, на фоне низкого развития транспортной инфраструктуры Севера и Арктики, удельная стоимость горюче-смазочных материалов и комплектующих дизельных электростанций повышается до 200% при сроках доставки до 2,5 лет.

Известно, что устойчивое функционирование солнечных электростанций и фотоэлектрических установок зависит от следующих условий:

- продолжительность солнечного сияния не менее 1800 ч/г, то есть преобладание количества дней с безоблачным небом;
- малая степень загрязненности окружающей воздушной среды;
- применение комплектующих фотоэлектрической установки высокого качества;
- другие условия.

При проектировании солнечных электростанций учитываются показатели эффективных солнечных часов, продолжительности солнечного сияния, соотношения дождливых и облачных дней, климатических условий и др. Однако в существующих нормативно-технических требованиях, применяемых в источниках [1–3], не учитываются факторы влияния различных видов облачности на работу солнечных электростанций и фотоэлек-

трических установок, что создает разницу между фактическим и прогнозным показателями выработки электроэнергии объектов.

Вследствие вышеуказанных факторов исследование методов повышения энергетической эффективности при проектировании и эксплуатации солнечных электростанций и фотоэлектрических установок микромощности в автономных электроэнергетических системах Севера и Арктики является актуальной и востребованной задачей.

АНАЛИЗ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В солнечных электростанциях Бурятии и Омской области зафиксирован низкий коэффициент использования установленной мощности, который составил 14% при значительных отклонениях генерирующей мощности 15–26% вследствие влияния климатических условий и различных видов облачности⁶. Снижение данных электроэнергетических параметров обосновывается в значительной мере влиянием различных видов облачности.

На примере использования программных комплексов при оценке энергетического потенциала объектов гелиоэнергетики применяются определенные закономерности, где учитывается коэффициент доли прохода солнечной радиации на наклонную площадку в условиях облачности только в трех случаях (пасмурно, небо полностью покрыто облаками, без единого голубого просвета) без учета существующих различных видов облачности с различными показателями пропускной способности солнечной радиации [4–7].

В работах [8–10] представлены и описаны методики определения влияния облачности на эффективность работы солнечных электростанций. В методике⁷ предлагается размещение объектов гелиоэнергетики в определенном виде на большой площади для снижения влияния облачности, вследствие которой обеспечивается стабильность генерирующей мощности электростанции. С по-

⁶Global market outlook for solar power / 2020–2024. Электронный ресурс. URL: <https://now.solar/2021/04/14/global-market-outlook-for-solar-power-2020-2024/> (15.06.2021).

⁷Виссарионов В. И., Дерюгина Г. В., Кузнецова В. А., Малинин Н. К. Солнечная энергетика: учеб. пособ. М.: ИД МЭИ, 2008. 276 с.

мощью данной методики достигается постоянная выработка электроэнергии в необходимом количестве в условиях переменной облачности.

Влияние различных видов облачности на работу солнечных электростанций имеет мгновенный характер с краткосрочными провалами генерирующей мощности. Эффект облачного покрова проявляется немедленно, с уменьшением глобального солнечного излучения, с последующим провалом генерирующей мощности на короткое время [11–14].

Неустойчивый характер облачности затрудняет долгосрочное прогнозирование выработки электроэнергии от объектов гелиоэнергетики с погрешностью до 22% в сравнении с расчетными показателями работы данных объектов в случае применения программных комплексов [15–18]. Необходимо отметить, что долгосрочное прогнозирование выработки электроэнергии от объектов гелиоэнергетики имеет сложную специфику в виде необходимости учета всех возможных природных явлений, в том числе облачности.

Анализ показал, что существующие исследования направлены на изучение применения программных комплексов при расчете выработки электроэнергии от солнечных электростанций, где облачность учитывается в виде 3 усредненных категорий облачности со средней разницей в 22% при сравнении с фактическими показателями выработки элек-

троэнергии существующих объектов гелиоэнергетики.

Таким образом, целью исследования является изучение и выявление влияния различных видов облачности на эффективность функционирования солнечной фотоэлектрической установки на примере территории центральной части Якутии.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Натурные исследования проводились в летний период (июнь–август) 2021 г. на территории Центральной Якутии, в рамках которых применялась экспериментальная установка, состоящая из: фотоэлектрической панели, контроллера заряда, аккумуляторной батареи, вспомогательной нагрузки, стационарного порта и инструментального обеспечения для сбора данных, программного обеспечения для обработки данных. Внешний вид экспериментальной установки представлен на рис. 1.

Место проведения экспериментальных работ имеет следующие показатели: продолжительность солнечного сияния – более 1800 ч в год; абсолютный температурный минимум составляет -62°C ; абсолютный температурный максимум составляет $+41^{\circ}\text{C}$; среднегодовые осадки – менее 250 мм в год; тип почвы – глинистая; наличие многолетней вечной мерзлоты.



Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки
Fig. 1. Exterior view of an experimental installation

Методика проведения натурных экспериментов имеет следующий порядок: проведение замеров освещенности для вычисления среднего показателя при определенных видах облачности; регистрация электрических параметров работы установки (в соответствии с показателями освещенности и визуальным сопоставлением характеров облачности); учет уровня заряда аккумуляторной батареи (уровень заряда составляет не менее 30% в целях обеспечения работоспособности оборудования и не более 55% – в целях предотвращения быстрого заряда батареи, недопущения холостой работы установки); обработка данных натурных исследований; оформление результатов натурных исследований в виде графических интерпретаций.

В ходе изучения параметров освещенности в условиях различных видов облачности проведены сопоставления результатов замеров освещенности со средними показателями освещенности, представленными в [19]. Результаты сопоставления представлены в табл. 1.

Среднее отклонение результатов замеров освещенности в сравнении с показателями освещенности, указанными в [19], при различных видах облачности составило 7,95%, что объясняется значительной сложностью визуального определения вида облачности и(или) ее переходных состояний.

На рис. 2 представлен график среднестатистических показателей генерирующей мощности фотоэлектрической установки при определенных видах облачности (в соответствии с табл. 1).

Мониторинг функционирования фотоэлектрической установки производился в течение летнего периода (июнь-август). График (см. рис. 2), зафиксированный синим цветом, показывает, что среднестатистический максимум удельной мощности составляет 0,4 Вт/Вт при безоблачном (ясном) небе. Среднестатистические удельные мощности при облачной погоде находятся в пределах 0,03–0,38 Вт/Вт в зависимости от вида облачности.

Регистрация показателей производилась во временных промежутках 09:00–20:00. Данный промежуток времени обосновывает-

ся среднестатистическими показателями периода светового дня и движением солнца по направлению «восток–юг–запад–север», в то время как поверхность фотоэлектрической панели направлена строго на «юг» в соответствии с действующими методиками размещения. Во время периода белых ночей фиксируется практически 24-часовое наличие солнечных лучей, но в ночной период (20:00–06:00) солнце направляется в северное направление и, следовательно, прямое попадание световых лучей на поверхность фотоэлектрической панели не представляется возможным.

В соответствии с выражением (1), производился расчет показателя снижения среднестатистической генерирующей мощности фотоэлектрической установки при каждом виде облачности на основе данных предыдущего графика (см. рис. 2).

$$\Delta_j = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n P_{j\text{обл}}}{\sum_{i=1}^n P_{\text{ясн}}}\right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

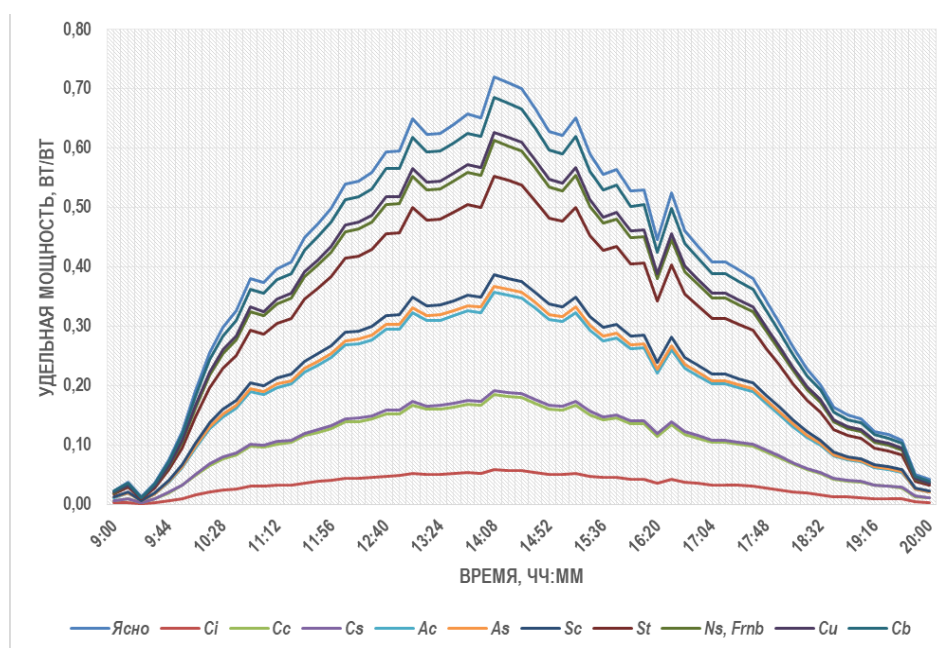
где Δ_j – показатель снижения среднестатистической генерирующей мощности фотоэлектрической установки при определенном виде облачности, о.е.; $P_{j\text{обл}}$ – среднестатистическая генерирующая мощность фотоэлектрической установки при определенном виде облачности, Вт/Вт; $P_{\text{ясн}}$ – среднестатистическая генерирующая мощность фотоэлектрической установки при безоблачном небе, Вт/Вт; j – номер вида облачности в соответствии с табл. 1; n – временной период мониторинга, в котором фиксировался определенный вид облачности, ед. [20–22].

В табл. 2 представлены результаты расчета показателя снижения генерирующей мощности фотоэлектрической установки при различных видах облачности.

На основании полученных и обработанных экспериментальных данных проводится анализ о влиянии различных видов облачности на эффективность функционирования фотоэлектрической установки.

Таблица 1. Сопоставление показателей освещенности
Table 1. Comparison of illumination indicators

№	Вид облачности	Краткое обозначение	Средняя освещенность, лк [19]	Средняя освещенность замеров, лк	Разница, %
1	Перистые облака	<i>Ci</i>	33 000	36 200	8,8
2	Перисто-кучевые облака	<i>Cc</i>	30 400	33 138	9,0
3	Перисто-слоистые облака	<i>Cs</i>	29 800	32 377	8,6
4	Высококучевые облака	<i>Ac</i>	26 600	29 220	9,8
5	Высокослоистые облака	<i>As</i>	22 400	20 401	9,7
6	Слоисто-кучевые	<i>Sc</i>	18 200	19 396	6,5
7	Слоистые облака	<i>St</i>	17 800	18 864	5,9
8	Слоисто-дождевые облака	<i>Ns, Frnb</i>	11 100	10 105	9,8
9	Кучевые облака	<i>Cu</i>	9 500	9 736	2,4
10	Кучево-дождевые облака	<i>Cb</i>	2 800	3 054	9,0
Среднее отклонение, %					7,95

**Рис. 2.** График среднестатистических показателей генерирующей мощности фотоэлектрической установки при различных видах облачности в определенном промежутке времени в течение летнего периода
Fig. 2. Graph of statistical average indicators of photovoltaic installation generating capacity under different types of cloud cover in a certain period of time during the summer period

В расчете параметров и показателей энергетического потенциала технико-экономического обоснования проектирования и строительства солнечных электростанций облачность как внешняя среда учитывается лишь в усредненном порядке в виде учета годовой продолжительности солнечного сияния и трех категорий облачности (пасмурно, небо полностью покрыто облаками, без единого голубого просвета). При применении

существующих методов точность расчетов искажается ввиду отсутствия учета влияния облачности. В отчетах региональных управлений по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды регистрируются все виды облачности, а также параметры солнечных лучей, которые могут быть применены в проведении расчетов прогноза выработки электроэнергии от объектов гелиоэнергетики.

Таблица 2. Показатели снижения генерирующей мощности фотоэлектрической установки при различных видах облачности относительно показателя при ясном небе

Table 2. Indicators of a decreasing generating capacity of a photovoltaic installation under various types of cloud cover relative to the clear sky indicator

№	Вид облачности	Краткое обозначение	Снижение мощности, %
1	Перистые облака	<i>Ci</i>	8,03
2	Перисто-кучевые облака	<i>Cc</i>	25,60
3	Перисто-слоистые облака	<i>Cs</i>	26,57
4	Высококучевые облака	<i>Ac</i>	49,60
5	Высокослоистые облака	<i>As</i>	51,00
6	Слоисто-кучевые	<i>Sc</i>	53,64
7	Слоистые облака	<i>St</i>	76,83
8	Слоисто-дождевые облака	<i>Ns, Frnb</i>	85,13
9	Кучевые облака	<i>Cu</i>	87,13
10	Кучево-дождевые облака	<i>Cb</i>	95,18

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Малая изученность влияния облачности и применения существующей методики оценки эффективности функционирования солнечных электростанций приводит к разнице фактических и расчетных (прогнозных) данных выработки электроэнергии солнечной электростанции на 22%.

В результате проведения экспериментальных исследований определены среднестатистические показатели освещенности, которые коррелируются с показателями освещенности по видам облачности (с разницей 7,95%). Погрешность объясняется расхождениями в визуальном определении вида облачности, а также возможностью уче-

та межвидовых граничных состояний облаков.

Показатели генерирующей мощности фотоэлектрической установки по степеням освещенности, соответствующие определенным видам облачности, составили от 8 до 95% в сравнении с мощностью установки во время ясного неба. Данное обстоятельство приводит к необходимости проведения дальнейших исследований и разработке методики по оценке влияния облачности и ее видов на пропускную способность солнечных лучей, падающих на поверхность фотоэлектрических панелей для более точного определения энергетического потенциала солнечной генерации в определенной местности.

Список источников

1. Дмитриенко В. Н., Лукутин Б. В. Методика оценки энергии солнечного излучения для фотоэлектростанции // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 5. С. 49–55. <http://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/1881>.
2. Тулегенова А. А. Потенциал энергообеспечения областей Казахстана с использованием возобновляемых источников Энергии // Альтернативная энергетика и экология. 2020. № 31-33. С. 72–80. <https://doi.org/10.15518/isaee.2020.11.008>.
3. Дебрин А. С., Семенов А. Ф., Бастрон А. В., Кузьмин П. Н. Проектирование энергоэффективных ФЭС для автономных систем электроснабжения сельскохозяйственных потребителей Красноярского края путем использования графо-семантической базы данных энергии солнечного излучения // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2020. № 3. С. 216–221.
4. Местников Н. П., Васильев П. Ф., Давыдов Г. И., Хоютанов А. М., Альзаккар А. М. Исследование возможности применения фотоэлектрических солнечных

- установок внутри купольного строения в условиях Севера // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. № 4. С. 435–449. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-435-449>.
5. Шакиров В. А., Яковкина Т. Н., Курбацкий В. Г. Методика оценки выработки электроэнергии солнечными электростанциями с использованием данных многолетних наблюдений метеостанций // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. №. 4. С. 858–875. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-858-875>.
6. Бабаев Б. Д. Расчет выработки электроэнергии местной солнечной электростанцией при оптимальных параметрах // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1: Естественные науки. 2021. Т. 36. Вып. 3. С. 21–28. <https://doi.org/10.21779/2542-0321-2021-36-3-21-28>.
7. Бабаев Б. Д. Программа расчета поступления возобновляемых энергоресурсов и оптимизации режимов эксплуатации энергокомплексов по динамике нагрузки потребителя // Проблемы совершенствования топлив-

но-энергетического комплекса: матер. XIV Междунар. науч.-техн. конф. (г. Саратов, 30 октября – 1 ноября 2018 г.). Саратов: Изд-во СГТУ им. Ю. А. Гагарина, 2018. С. 55–60.

8. Торговкин Н. В., Макаров В. Н. Влияние современных климатических изменений на геохимические особенности мерзлотных почв г. Якутск // Устойчивость природных и технических систем в криолитозоне: матер. Всерос. конф. с междунар. участием, посвященной 60-летию образования Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН (г. Якутск, 28–30 сентября 2020 г.). Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2020. С. 182–184.

9. Perez R., Cebecauer T., Šúri M. Semi-empirical satellite models. Chapter 2 // Solar Energy Forecasting and Resource Assessment. Academic press, 2013. P. 21–48. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397177-7.00002-4>.

10. Šúri M., Cebecauer T., Skoczek A. Solargis: solar data and online applications for pv planning and performance assessment // 26th European Photovoltaics Solar Energy Conference. Hamburg, 2011. <https://solargis2-web-assets.s3.eu-west-1.amazonaws.com/public/publication/2011/5514f381d4/Suri-Cebecauer-Skoczek-EUPVSEC2011-Solargis-solar-data-and-online-applications-for-PV-planning-and-performance-assessment.pdf>

11. Suri M., Cebecauer T., Skoczek A., Marais R., Mushwana C., Reinecke J., et al. Cloud cover impact on photovoltaic power production in South Africa // South African Solar Energy Conference: Proceedings of the 2nd. Port Elizabeth, 2014. <https://solargis2-web-assets.s3.eu-west-1.amazonaws.com/public/publication/2014/7e83f59297/Suri-et-al-SASEC2014-Cloud-cover-impact-on-PV-power-production-in-South-Africa.pdf>

12. Bonkaney A., Madougou S., Adamou R. Impacts of cloud cover and dust on the performance of photovoltaic module in Niamey // Journal of Renewable Energy. 2017. Vol. 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/9107502>.

13. Kern E. C., Gulachenski E. M., Kern G. A. Cloud effects on distributed photovoltaic generation: low transients at the Gardner, Massachusetts photovoltaic experiment // IEEE Transactions on Energy Conversion. 1989. Vol. 4. Iss. 2. P. 184–190. <https://doi.org/10.1109/60.17910>.

14. Mestnikov N., Vasiliev P., Alzakkar A. Development of method of protection of solar panels against dust pollution in the Northern part of the Russian Far East // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2021. <https://doi.org/10.1109/UralCon52005.2021.9559596>.

15. Mahalakshmi R., Aswin Kumar A., Kumar A. Design of fuzzy logic based maximum power point tracking controller for solar array for cloudy weather conditions // Power and energy systems: towards sustainable energy. 2014. <https://doi.org/10.1109/PESTSE.2014.6805308>.

16. Detyniecki M., Marsala C., Krishnan A., Siegel M. Weather-based solar energy prediction // IEEE International Conference on Fuzzy Systems. 2012. <https://doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2012.6251145>.

17. Lofthouse J., Simmons R. T., Yonk R. M. Reliability of renewable energy: solar. Электронный ресурс. URL: <https://www.usu.edu/ipe/wp-content/uploads/2015/11/Reliability-Solar-Full-Report.pdf> (12.06.2021).

18. Sowa S. Improving the energy efficiency of lighting systems by the use of solar radiation // 17th International Conference Heat Transfer and Renewable Sources of Energy (HTRSE-2018): E3S Web Conference. 2018. Vol. 70. P. 01013. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20187001013>.

19. Шиловцева О. А. Световые ресурсы Москвы // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 6-2. С. 88–96.

20. Местников Н. П., Альзаккар А. М.-Н. Исследование влияния холодного климата Якутии на функционирование монокристаллической солнечной системы генерации электроэнергии // Тинчуринские чтения – 2021 «Энергетика и цифровая трансформация»: матер. Междунар. молодежной науч. конф. (г. Казань, 28–30 апреля 2021 г.). Казань: ООО Полиграфическая компания «Астор и Я», 2021. С. 256–260.

21. Васильев П. Ф., Местников Н. П. Исследование влияния резко-континентального климата Якутии на функционирование солнечных панелей // Международный технико-экономический журнал. 2021. № 1. С. 57–64. <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-76-1-57-64>.

22. Нуруллин Э. Г., Зайнутдинова Э. Э., Салахутдинов И. А. Методические предпосылки по разработке комбинированной системы электроснабжения сельскохозяйственного предприятия с применением нетрадиционных источников энергии // Сельское хозяйство и продовольственная безопасность: технологии, инновации, рынки, кадры: научн. тр. II Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 70-летию Института механизации и технического сервиса и 90-летию Казанской зоотехнической школы (г. Казань, 28–30 мая 2020 г.). Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2020. С. 26–32.

References

1. Dmitrienko V. N., Lukutin B. V. Method for estimating solar radiation energy for photovoltaic plants. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2017;328(5):49-55. (In Russ.). <http://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/1881>.

2. Tulegenova A. A. Energy supply potential of the Ka-

zakhstan regions with the use of renewable energy sources. *Alternativnaya energetika i ekologiya = Alternative Energy and Ecology*. 2020;31-33:72-80. (In Russ.). <https://doi.org/10.15518/isjaee.2020.11.008>.

3. Debrin A. S., Semenov A. F., Bastron A. V., Kuz'min P. N. The design of energy efficient FSES for autonomous power supply systems to agricultural consumers of Kras-

noyarsk Krai by using the grapho-semantic database of solar radiation energy. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2020;3:216-221. (In Russ.).

4. Mestnikov N. P., Vasilyev P. F., Davydov G. I., Khoyutyanov A. M., Alzakkar A. M. Applicability of photoelectrical solar units inside domical structures in northern conditions. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(4):435-449. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-435-449>.

5. Shakirov V. A., Yakovkina T. N., Kurbatsky V. G. Methodology for assessing electricity generation by solar power plants using data from long-term observations of meteorological stations. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(4):858-875. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-858-875>.

6. Babaev B. D. Calculation of electricity generation by a local solar power plant with optimal parameters. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1: Estestvennye nauki = Herald of Dagestan State University*. 2021;36(3):21-28. (In Russ.). <https://doi.org/10.21779/2542-0321-2021-36-3-21-28>.

7. Babaev B. D. Program for calculating the influx of renewable energy resources and optimizing the operation modes of power complexes according to consumer load dynamics. In: *Problemy sovershenstvovaniya toplivno-energeticheskogo kompleksa: materialy XIV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Problems of fuel and energy complex improvement: proceedings of the 14th International Scientific and Technical Conference*. 30 October – 1 November 2018, Saratov. Saratov: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; 2018, p. 55-60. (In Russ.).

8. Torgovkin N. V., Makarov V. N. Climate change influence on geochemical features of cryosoles in Yakutsk. In: *Ustojchivost' prirodnyh i tekhnicheskikh sistem v kriolitozone: materialy Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoj 60-letiyu obrazovaniya Instituta merzlotovedeniya im. P. I. Mel'nikova Sibirskogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk = Stability of natural and engineering systems in the cryolithozone: materials of All-Russian conference with international participation dedicated to the 60th anniversary of the formation of the P. I. Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*. 28–30 September 2020, Yakutsk. Yakutsk: P. I. Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2020, p. 182-184. (In Russ.).

9. Perez R., Cebecauer T., Šuri M. Semi-empirical satellite models. Chapter 2. In: *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*. Academic press; 2013, p. 21-48. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397177-7.00002-4>.

10. Šuri M., Cebecauer T., Skoczek A. Solargis: solar data and online applications for pv planning and performance assessment. In: *26th European Photovoltaics Solar Energy Conference*. Hamburg; 2011. <https://solargis2-web-assets.s3.eu-west-1.amazonaws.com/public/publication/2011/5514f381d4/Suri-Cebecauer-Skoczek>

EUPVSEC2011-Solargis-solar-data-and-online-applications-for-PV-planning-and-performance-assessment.pdf

11. Suri M., Cebecauer T., Skoczek A., Marais R., Mushwana C., Reinecke J., et al. Cloud cover impact on photovoltaic power production in South Africa. In: *South African Solar Energy Conference: Proceedings of the 2nd*. Port Elizabeth; 2014. <https://solargis2-web-assets.s3.eu-west-1.amazonaws.com/public/publication/2014/7e83f59297/Suri-et-al-SASEC2014-Cloud-cover-impact-on-PV-power-production-in-South-Africa.pdf>

12. Bonkaney A., Madougou S., Adamou R. Impacts of cloud cover and dust on the performance of photovoltaic module in Niamey. *Journal of Renewable Energy*. 2017;2017. <https://doi.org/10.1155/2017/9107502>.

13. Kern E. C., Gulachenski E. M., Kern G. A. Cloud effects on distributed photovoltaic generation: slow transients at the Gardner, Massachusetts photovoltaic experiment. In: *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1989;4(2):184-190. <https://doi.org/10.1109/60.17910>.

14. Mestnikov N., Vasiliev P., Alzakkar A. Development of method of protection of solar panels against dust pollution in the Northern part of the Russian Far East. In: *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. 2021. <https://doi.org/10.1109/UralCon52005.2021.9559596>.

15. Mahalakshmi R., Aswin Kumar A., Kumar A. Design of fuzzy logic based maximum power point tracking controller for solar array for cloudy weather conditions. In: *Power and energy systems: towards sustainable energy*. 2014. <https://doi.org/10.1109/PESTSE.2014.6805308>.

16. Detyniecki M., Marsala C., Krishnan A., Siegel M. Weather-based solar energy prediction. In: *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. 2012. <https://doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2012.6251145>.

17. Lofthouse J., Simmons R. T., Yonk R. M. Reliability of renewable energy: solar. Available from: <https://www.usu.edu/ipe/wp-content/uploads/2015/11/Reliability-Solar-Full-Report.pdf> [Accessed 12th June 2021].

18. Sowa S. Improving the energy efficiency of lighting systems by the use of solar radiation. In: *17th International Conference Heat Transfer and Renewable Sources of Energy (HTRSE-2018): E3S Web Conference*. 2018;70:01013. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20187001013>.

19. Shilovtseva O. A. Light resources of Moscow. *Alternativnaya energetika i ekologiya = Alternative Energy and Ecology*. 2013;6-2:88-96. (In Russ.).

20. Mestnikov N. P., Al'zakkar A. M.-N. Studying the influence of cold climate of Yakutia on operation of a monocrystalline solar power generation system. *Tinchurinskie chteniya – 2021 «Energetika i cifrovaya transformaciya»: materialy Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii = Tinchurinskie readings - 2021 "Energy and digital transformation": materials of the International youth scientific conference*. 28–30 April 2021, Kazan'. Kazan': Astor i Ya; 2021, p. 256-260. (In Russ.).

21. Vasilyev P. F., Mestnikov N. P. Research of the effect of the sharply continental climate of Yakutia on the func-

tioning of solar panels. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskij zhurnal*. 2021;1:57-64. <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-76-1-57-64>.

22. Nurullin E. G., Zajnutdinova E. E., Salahutdinov I. A. Methodological basis for the development of a combined power supply system for an agricultural enterprise using unconventional energy sources. In: *Sel'skoe hozyajstvo i prodovol'stvennaya bezopasnost': tekhnologii, innovacii, rynki, kadry: nauchnye trudy II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 70-letiyu Insti-*

tuta mekhanizacii i tekhnicheskogo servisa i 90-letiyu Kazanskoy zootekhnicheskoy shkoly = Agriculture and food security: technologies, innovations, markets, personnel: scientific works of the 2nd International scientific and practical conference dedicated to the 70th anniversary of the Institute of Mechanization and Technical Service and the 90th anniversary of the Kazan Zootechnical School. 28–30 May 2020, Kazan'. Kazan': Kazanskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet; 2020, p. 26-32. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Местников Николай Петрович,

аспирант,
ассистент кафедры электроснабжения,
Северо-Восточный федеральный университет
им. М.К. Аммосова,
677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58,
Республика Саха (Якутия);
ведущий инженер Отдела электроэнергетики,
Институт физико-технических проблем Севера
СО РАН,
677007, г. Якутск, ул. Кулаковского, 42,
Республика Саха (Якутия)

Васильев Павел Филиппович,

кандидат технических наук,
заведующий кафедрой электроснабжения,
Северо-Восточный федеральный университет
им. М.К. Аммосова,
677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58,
Республика Саха (Якутия);
заведующий Отделом электроэнергетики,
Институт физико-технических проблем Севера
СО РАН,
677007, г. Якутск, ул. Кулаковского, 42,
Республика Саха (Якутия)

Давыдов Геннадий Иванович,

научный сотрудник Отдела электроэнергетики,
Институт физико-технических проблем Севера
СО РАН,
677027, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1,
Республика Саха
(Якутия)

Хоютанов Александр Михайлович,

научный сотрудник Отдела электроэнергетики,
Институт физико-технических проблем Севера
СО РАН,
677027, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1,
Республика Саха
(Якутия)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolay P. Mestnikov,

Postgraduate student,
Assistant Professor of the Department of Power Supply,
M.K. Ammosov North-Eastern Federal University,
58 Belinsky St., Yakutsk 677000,
Republic of Sakha
(Yakutia);
Leading Engineer of the Department of Electric Power,
Institute of Physical-Technical Problems of the North
of the Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences,
42 Kulakovskiy St., Yakutsk 677007,
Republic of Sakha (Yakutia)

Pavel F. Vasilyev,

Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Department of Power Supply,
M.K. Ammosov North-Eastern Federal University,
58 Belinsky St., Yakutsk 677000, Republic of Sakha
(Yakutia);
Head of the Electric Power Engineering Department,
Institute of Physical-Technical Problems of the North of
the Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences,
42 Kulakovskiy St., Yakutsk 677007,
Republic of Sakha (Yakutia)

Gennadiy I. Davydov,

Researcher of the Department of Electric Power
Engineering,
Institute of Physical-Technical Problems of the North of
the Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences,
1 Oktyabrskaya St., Yakutsk 677027, Republic of Sakha
(Yakutia)

Aleksandr M. Khoyutanov,

Researcher of the Department of Electric Power
Engineering,
Institute of Physical-Technical Problems of the North of
the Siberian Branch of the Russian Academy of
Sciences,
1 Oktyabrskaya St., Yakutsk 677027, Republic
of Sakha (Yakutia)

Альзаккар Ахмад Мухаммед-Насер,
аспирант,
Казанский государственный энергетический
университет,
420066, г. Казань, ул. Яруллина, 6, Россия

Ahmad M.-N. Alzakkar,
Postgraduate student,
Kazan State Power Engineering University,
6 Yarullin St., Kazan 420066, Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 29.07.2021; одобрена после рецензирования 14.12.2021; принята к публикации 08.02.2022.

Information about the article

The article was submitted 29.07.2021; approved after reviewing 14.12.2021; accepted for publication 08.02.2022.