

Арктика и Север. 2025. № 61. С. 27–43.

Научная статья

УДК 620.92(470.11)(045)

DOI: <https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2025.61.27>

Оценка потенциала внедрения солнечных панелей как альтернативных источников энергии на территории г. Архангельска

Громов Антон Андреевич^{1✉}, аспирант

Романов Кирилл Альбертович², аспирант

Алексеев Павел Денисович³

Марьяндышев Павел Андреевич⁴, доктор технических наук

Чжоу Вейсин⁵, профессор

^{1, 2, 3, 4} Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, набережная Северной Двины, 17, Архангельск, Россия

⁵ Школа энергетических наук и инженерии, Харбинский политехнический институт, Харбин, Китай

⁵ Чжэнчжоуский научно-исследовательский институт, Чжэнчжоу, Китай

¹ gromov.a@edu.narfu.ru ✉, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0575-8820>

² a.k.romanov@narfu.ru

³ p.alekseev@narfu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0468-2101>

⁴ p.marjandyshhev@narfu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3880-8289>

⁵ zhouweixing@hit.edu.cn


Аннотация. В настоящее время во всём мире большое внимание уделяется зелёной экономике. Альтернативные источники энергии приходят на смену традиционным и всё чаще находят поддержку у государства и инвесторов. В стране и в мире реализуются крупные проекты в отрасли возобновляемых источников энергии. В северо-западной части России наиболее известным примером реализации таких проектов является Кольская ветряная электростанция, являющаяся самым большим подобным объектом, находящимся за полярным кругом. На территории Архангельской области относительно других регионов потенциал данной отрасли невелик, что вызывает желание местных учёных и представителей энергетического сектора региона выявить способы наиболее эффективного применения альтернативных источников энергии. Постоянно ведутся исследования и оценки эффективности внедрения таких способов получения энергии, как солнечные или ветровые электростанции. В данной работе представлены результаты исследования интенсивности солнечной энергии в центральной части города Архангельска с использованием солнечной электростанции, произведён анализ зависимости выработки электрической энергии от внешних факторов, таких как температура и влажность, получены данные о средних показателях ежедневной выработки электрической энергии. Производится расчёт экономической эффективности данного эксперимента и делается вывод об эффективности использования солнечных фотоэлектрических панелей на территории города Архангельска.

Ключевые слова: Архангельск, зелёная экономика, солнечные фотоэлектрические панели, возобновляемая энергетика, Арктика

* © Громов А.А., Романов К.А., Алексеев П.Д., Марьяндышев П.А., Чжоу В., 2025

Для цитирования: Громов А.А., Романов К.А., Алексеев П.Д., Марьяндышев П.А., Чжоу В. Оценка потенциала внедрения солнечных панелей как альтернативных источников энергии на территории г. Архангельска // Арктика и Север. 2025. № 61. С. 27–43. DOI: <https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2025.61.27>

For citation: Gromov A.A., Romanov K.A., Alekseev P.D., Maryandyshhev P.A., Zhou W. Assessment of the Potential for Solar Panel Implementation as Alternative Energy Sources in the City of Arkhangelsk. *Arktika i Sever* [Arctic and North], 2025, no. 61, pp. 27–43. DOI: <https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2025.61.27>

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Благодарности и финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSRU-2024-0007.

Assessment of the Potential for Solar Panel Implementation as Alternative Energy Sources in the City of Arkhangelsk

Anton A. Gromov^{1✉}, Postgraduate student

Kirill A. Romanov², Postgraduate student

Pavel D. Alekseev³

Pavel A. Maryandyshev⁴, Dr. Sci. (Tech.)

Weixing Zhou⁵, Professor

^{1, 2, 3, 4} Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, Russia

⁵ School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China

⁵ Zhengzhou Research Institute, Zhengzhou, China

¹ gromov.a@edu.narfu.ru ✉, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0575-8820>

² a.k.romanov@narfu.ru

³ p.alekseev@narfu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0468-2101>

⁴ p.marjyandishev@narfu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3880-8289>

⁵ zhouweixing@hit.edu.cn

Abstract. The green economy is currently receiving considerable attention around the world. Alternative energy sources are replacing traditional ones and are increasingly supported by the government and investors. Large projects in the renewable energy sector are being implemented in the country and world-wide. In the northwestern part of Russia, the most well-known example of such a project is the Kola wind farm, which is the largest facility located above the Arctic Circle. Compared to other regions, the potential of this industry in the Arkhangelsk Oblast is relatively small, which has prompted local scientists and representatives of the region's energy sector to identify ways to make the most effective use of alternative energy sources. Research and assessments of the effectiveness of implementing such energy generation methods as solar or wind power plants are constantly being carried out. This paper presents the results of a study of solar energy intensity in the central part of the city of Arkhangelsk using a solar power plant, analyses the dependence of electricity generation on external factors such as temperature and humidity, and provides data on average daily electricity generation. The economic efficiency of this experiment is calculated, and a conclusion is made about the effectiveness of using solar photovoltaic panels in the city of Arkhangelsk.

Keywords: Arkhangelsk, green economy, solar photovoltaic panels, renewable energy, Arctic

Введение

Во все времена человечество использовало и продолжает использовать ископаемые виды топлива для обеспечения различными видами энергии. Такие виды топлива являются самыми легко добываемыми и простыми в использовании, но постоянное их использование на протяжении многих лет постепенно приводит к ухудшению общей экологической обстановки в мире, а также к довольно заметному истощению запасов ископаемых видов топлива. Самым очевидным путём влияния на обе вышеуказанные угрозы является внедрение в системы мирового энергообеспечения большего количества альтернативных источников энергии [1, Al–Okbi A., Vankov Y., Hussain H.M., с. 1; 2, Upadhyay S., Sharma M.P., с. 48–50; 3, с. 26–32]. Одним из таких источников энергии является энергия солнца.

Энергия солнца также имеет ряд довольно заметных недостатков: низкий коэффициент полезного действия, зависимость от метеоусловий, сложность преобразования в другие виды энергии. Данный вид энергии становится всё более распространенным ввиду одного лишь фактора — отсутствия явного влияния на окружающую среду и каких-либо выбросов при выработке одного из самых простых видов энергии — электрической [4, Xinghui Z., Jiaojiao Y., Yi F. at al., с. 214; 5, Filippo P., Nelson S., Francesca L. at al., с. 4].

Для преобразования энергии солнца в электрическую энергию используют солнечные фотоэлектрические панели. Такие панели имеют значительное преимущество перед другими альтернативными источниками энергии — их можно использовать в различных географических точках и ландшафтах без снижения эффективности: в горах, на равнинах и в лесах эффективность использования данного источника энергии будет равнозначна при равных условиях солнечной активности [6, Олейников А.М., Канов Л.Н., с. 62–63]. Масштабы их применения тоже не имеют значения: солнечные панели применяются как на больших электростанциях, питающих целые регионы, так и в индивидуальном режиме — устанавливаются на уединённые дачные участки, коттеджные посёлки, промышленные цеха и предприятия [7, Gloeckler M., Sankin I., Zhao Z., с. 1390–1391; 8, Ali N., Hussain A., Ahmed R. at al., с. 727].

Учитывая климатические особенности Архангельской области, использование таких источников энергии, как ветровая или солнечная, может рассматриваться в малых масштабах для обеспечения электрической энергией отдельных домохозяйств или предприятий [9, Yu L., Yixiang S., Ningsheng, с. 43–44; 10, Pandey A., Tyagi V., Jeyraj A. at al., с. 862].

Для корректной оценки возможности использования потенциала конкретной территории для получения энергии солнца необходимо учитывать множество факторов: солнечная активность и её изменение по месяцам и сезонам, ландшафт территории, влажность в регионе использования, а также температурный режим, который также оказывает влияние на коэффициент полезного действия солнечных панелей. Все вышеуказанные характеристики можно получить, воспользовавшись официальными метеорологическими источниками, но зачастую полученные оттуда данные оказываются завышенными по сравнению с реальными показателями на исследуемой местности.

Целью данной работы является получение и обработка данных с установленной на территории университета фотоэлектрической солнечной электростанции (далее — СЭС). По полученным данным делается вывод об эффективности работы данной солнечной панели при её использовании в качестве источника электрической энергии для одного из учебно-лабораторных корпусов Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова (далее — САФУ).

Материалы и методы

Для определения значений суммарной солнечной радиации для координат 64°53'02" северной широты и 40°55'17" восточной долготы (местонахождение СЭС САФУ) была исполь-

зована наземная метеостанция DAVIS Instruments Vantage Pro 2 (далее — метеостанция СА-ФУ) и детектор солнечной радиации PCE-SPM 1 (далее — детектор солнечной радиации). Данные об уровне генерации электрической энергии массива СБ в зависимости от количества солнечной радиации регистрировались в системе СЭС САФУ.

Измерение суммарной солнечной радиации, достигающей горизонтальной поверхности Земли, осуществлялось с помощью датчика солнечной радиации, установленного под прямым углом к земной поверхности, представленного на рис. 1, входящего в комплект метеостанции, представленной на рис. 2. Также в комплект данной метеостанции входят: блок управления метеостанцией, датчик температуры, датчик относительной влажности воздуха, датчик атмосферного давления, датчик осадков, анемометр. Параметры, измеряемые метеостанцией: атмосферное давление, уличная и комнатная температура воздуха, уличная и комнатная относительная влажность воздуха, скорость и направление ветра, температура точки росы, количество и интенсивность осадков, дата и время, прогноз погоды, фаза луны, время восхода и захода солнца.



Рис. 1. Датчик суммарной солнечной радиации.



Рис. 2. Метеостанция DAVIS Instruments Vantage Pro 2 с блоком управления.

Для измерения отражённой солнечной радиации использовался прибор PCE-SPM 1, изображенный на рис. 3 [11, Kafetzis A., Ziogou C., Panopoulos K.D. et al., с. 14; 12, Elmohlawy

А.Е., Ochkov V.F., Kazandzhan B.I., с. 3]. Детектор регистрировал суммарную солнечную радиацию, включающую прямое, рассеянное и отражённое излучение. Для оценки вклада отражённой радиации были проведены дополнительные измерения при различных углах наклона датчика (-90° , -45° , 0° , 45° и 90°), что позволило зафиксировать отражённое излучение от различных типов поверхностей, включая снежный покров и грунт.

Полученные данные показали, что снежный покров значительно увеличивает долю отражённой радиации в суммарной, что особенно актуально для высоких широт в весенний период. Тем не менее, в данной работе не выделялись отдельные составляющие (прямое, рассеянное и отражённое излучение), что планируется сделать в последующих исследованиях с использованием соответствующих моделей и методов анализа. Учёт этих факторов позволит повысить точность оценки влияния отражённой радиации на работу солнечных фотоэлектрических элементов.



Рис. 3. Детектор солнечной радиации PCE-SPM 1.

Исследуемый массив СБ является частью СЭС САФУ. СЭС интегрирована в общую систему электроснабжения здания лаборатории кафедры теплоэнергетики и теплотехники. Схема электроснабжения спроектирована таким образом, что возможен полный вывод СЭС из системы электроснабжения лаборатории для проведения исследований без потери питания на нагрузке [13, Alramlawi M., Li P., с. 2025].

Разработанной схемой обеспечивается работа приборов нагрузки в трёх вариантах:

- нагрузка питается только за счёт мощности альтернативных источников энергии;
- нагрузка питается только от ВРУ здания;
- нагрузка питается от альтернативных источников энергии с возможностью подпитки недостающей мощности из сети.

Мониторинг и запись параметров, исследуемых СБ, проводились с помощью программно-аппаратного комплекса «Малина-2» на основе микрокомпьютера для дистанционного мониторинга электросетей и управления инверторами, MPPT-контроллерами и аккумуляторами. С помощью данного программного обеспечения фиксировались основные параметры работы солнечной электростанции, в частности мощность и сила тока, вырабатываемые

мая солнечными панелями, состояние заряда и напряжения аккумуляторных батарей, потребляемая мощность [14, Романов К., с. 247].

Комплектация СЭС представлена в табл. 1 [14, с. 246]. Основные характеристики СЭС представлены в табл. 2 [14, с. 246]. Технические характеристики комплектующих представлены в табл. 3–6 [14, с. 246–247]. На рис. 4 изображено расположение метеостанции и элементов СЭС.

Солнечные фотоэлектрические элементы были установлены с углом наклона 30° к горизонтальной поверхности и ориентированы на юг (азимут 0°). Такой выбор обусловлен рекомендациями для максимальной эффективности работы панелей в условиях северных широт.

Таблица 1

Комплектация СЭС

Наименование комплектующего	Количество, шт.
СБ	6
Инвертор	1
Контроллер MPPT	1
Аккумуляторная батарея	8

Таблица 2

Основные характеристики СЭС

Параметр	Значение
Номинальная мощность	1 200 Вт
Выходное напряжение	220 В
Частота	50 Гц

Таблица 3

Технические характеристики солнечной панели

Параметр	Значение
Номинальное напряжение солнечной батареи	24 В
Номинальная мощность	200 Вт
Напряжение при пиковой мощности	30 В
Напряжение холостого хода	36,5 В
Ток короткого замыкания	7,13 А
Ток при пиковой мощности	6,67 А
Максимальное напряжение в системе	1 000 В
Коннектор	MC4
Размер (ДхШхГ)	1326 x 990 x 35 мм
Вес	16 кг
Температура эксплуатации	от -40 до $+85^\circ\text{C}$
Степень герметизации	IP 65
Светопроницаемость стекла	97%
Стекло	Закалённое, с антибликовым покрытием
Ветровая нагрузка	до 60 м/с (200 кг на квадратный метр)
Эффективность фотоэлектрического преобразования (КПД)	до 17,3%
Тип фотоэлементов	Поликристаллические

Таблица 4

Технические характеристики АКБ

Параметр	Значение
Модель аккумулятора	GST 12-100 SOLAR 12В 100 А·ч
Срок службы	До 12 лет
Ёмкость	100 А·ч
Электролит	Серная кислота, загущённая в гель

Таблица 5

Технические характеристики инвертора

Параметр	Значение
Номинальная мощность	6 000 Вт
КПД	93%
Напряжение аккумуляторной батареи	24 В
Выходное напряжение	220 В
Частота выходного напряжения	50 Гц
Пиковая мощность	9 000 Вт
Максимальная мощность	6 000 Вт
Собственное потребление на холостом ходу	9,6–14,4 Вт

Таблица 6

Технические характеристики MPPT-контроллера

Параметр	Значение
Напряжение батареи	12, 24, 36, 48, 96 В
Максимальный ток заряда	100 А
Максимальная мощность блока солнечный батарей	12В — 1 350 Вт, 24В — 2 750 Вт, 48В — 5 500 Вт, 96В — 1 100 Вт
Максимальное рабочее напряжение блока солнечных батарей	185 В
Энергопотребление в режиме ожидания	не более 1,9 Вт
КПД при полной нагрузке	12 В — 95 %, 24 В — 96,5 %
Тип используемых аккумуляторов	гелевые, свинцово-кислотные, щелочные
Рабочая температура	от -40 °С до 60 °С
Влажность (без конденсата)	95%



Рис. 4. Расположение СЭС и метеостанции.

Измерение суммарной солнечной радиации проводится с 2019 г. метеостанцией, установленной перпендикулярно земной поверхности. Измерение отражённой от снежного покрова и суммарной солнечной радиации детектором солнечной радиации проводились в частных случаях для определения моментального значения радиации в весенние периоды года.

Результаты и их обсуждение

В результате проведённого исследования были получены и обработаны данные о солнечной активности, влажности, температуре окружающей среды и выработке электрической энергии при помощи установленной на территории университета фотоэлектрической станции.

Информация о полученных данных отражена на рис. 5–7. В данном исследовании представлены результаты, полученные в течение всего 2023 г. за исключением месяцев, когда на точность измерения влияли погодные условия. Образовывающаяся ледовая корка в течение января, февраля, ноября и декабря не позволяла считывать данные с максимальной точностью. В настоящее время проведение эксперимента продолжается.

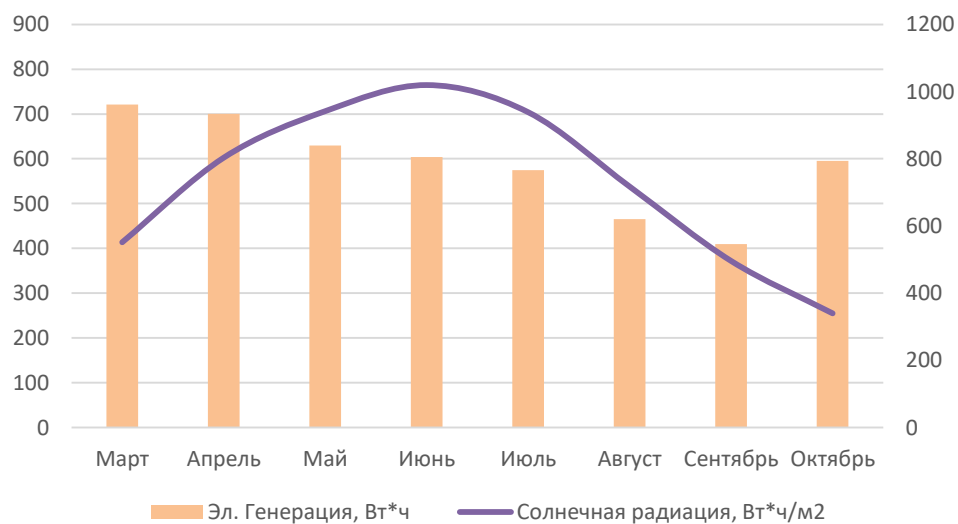


Рис. 5. Зависимость выработки электрической энергии от солнечной радиации в течение 2023 г.

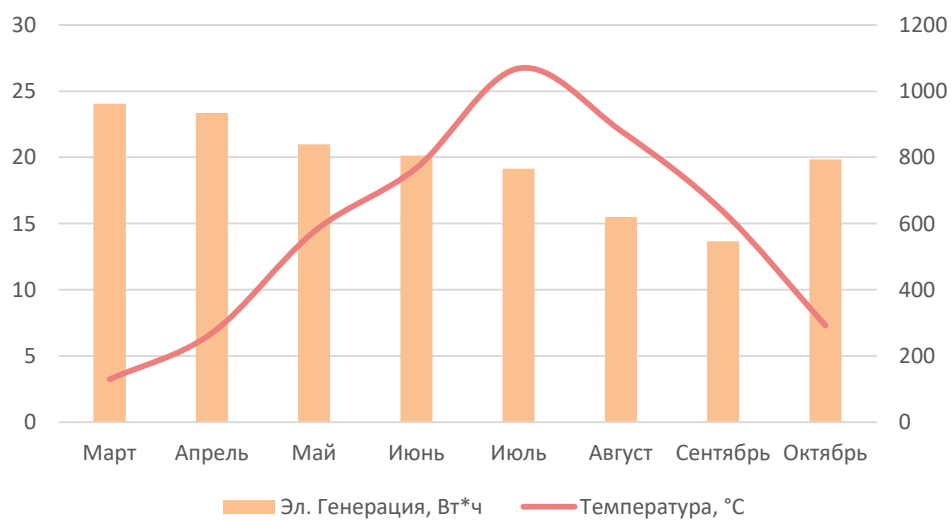


Рис. 6. Зависимость выработки электрической энергии от температуры окружающей среды в течение 2023 г.

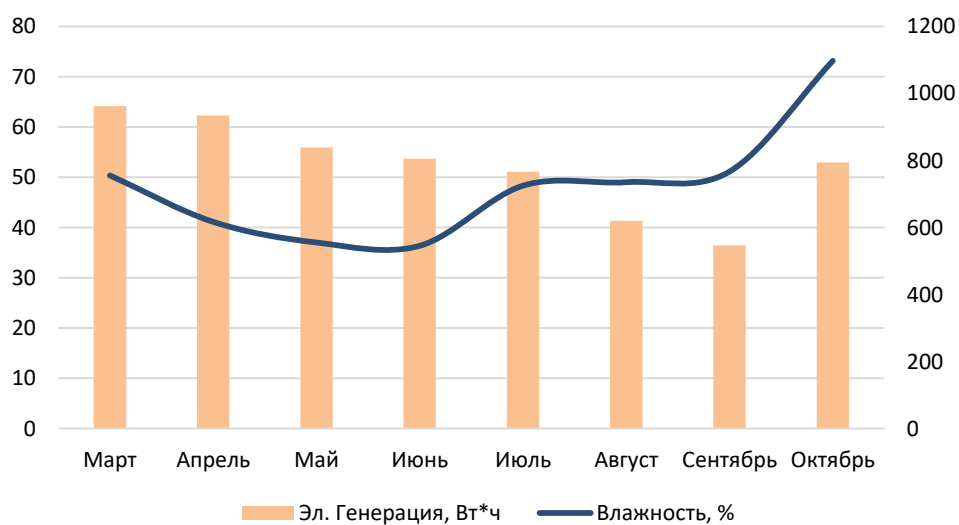


Рис. 7. Зависимость выработки электрической энергии от влажности в течение 2023 г.

Одним из важных факторов, влияющих на выработку электрической энергии солнечными фотоэлектрическими элементами, является температура окружающей среды и самих модулей. Для анализа температурного влияния в условиях города Архангельска была проведена оценка зависимости выработки энергии от температуры модулей, зарегистрированной в ходе эксперимента. Согласно полученным данным, увеличение температуры модуля приводило к уменьшению выработки энергии, что соответствует известным температурным коэффициентам снижения эффективности фотоэлектрических элементов, указанным в технической документации. Например, в диапазоне температур от -7°C до $+25^{\circ}\text{C}$ снижение выработки составило до 8% на каждые 10°C повышения температуры. Это подтверждает необходимость учитывать температурные колебания при проектировании систем солнечной энергии в регионах с разнообразными климатическими условиями. В то же время влажность и солнечная активность влияют на выработку электрической энергии прямо пропорционально.

Анализируя экспериментальные результаты, представленные на рис. 5–7, было отмечено, что в весенние месяцы количество генерируемой энергии СЭС превышает аналогичные значения в летние месяцы при меньшем уровне солнечной инсоляции. Двумя факторами, наиболее влияющими на эффективную генерацию в весенние месяцы, являются температура окружающей среды и зенитный угол Солнца. В рамках исследования солнечные панели были установлены с фиксированным углом наклона 30° к горизонтальной поверхности и направлены строго на юг (азимут 0°). Такой выбор ориентации обусловлен максимизацией эффективности выработки энергии в условиях северных широт.

При проведениях экспериментов был выявлен фактор влияния отражённой солнечной радиации, не учтённый в регрессионных моделях, но влияющий на работу фотоэлементов.

Рассмотрим работу СЭС в точно выбранные весенний и летний дни. В табл. 7–8 представлены основные данные о работе 7 апреля и 15 июля 2023 г.

Таблица 7

Экспериментальные данные о работе установки 7 апреля 2023 г.

Время	Генерация СЭС, Вт·ч	Инсоляция Вт·ч/м ²	Температура, °C	Влажность, %	Зенитный угол, °
0:00	0	0	-4	46	90
1:00	0	0	-5	43	90
2:00	0	0	-5	44	90
3:00	0	0	-6	45	90
4:00	0	0	-7	47	90
5:00	1	8	-7	49	89
6:00	17	65	-7	49	83
7:00	47	178	-6	46	76
8:00	104	274	-4	43	70
9:00	347	432	-2	39	65
10:00	547	512	2	28	61
11:00	643	555	4	23	58
12:00	762	573	4	24	58
13:00	906	549	5	20	59

14:00	829	492	6	19	62
15:00	498	393	6	18	66
16:00	448	291	8	16	72
17:00	249	208	8	17	78
18:00	18	91	8	25	84
19:00	0	23	7	31	90
20:00	0	0	5	36	90
21:00	0	0	3	37	90
22:00	0	0	1	39	90
23:00	0	0	0	41	90

Таблица 8

Экспериментальные данные о работе установки 15 июля 2023 г.

Время	Генерация СЭС, Вт·ч	Инсоляция Вт·ч/м ²	Температура, °С	Влажность, %	Зенитный угол, °
0:00	0	0	18	64	90
1:00	0	0	18	66	90
2:00	0	2	18	68	90
3:00	2	17	17	68	87
4:00	12	32	17	70	82
5:00	22	127	18	69	76
6:00	22	293	19	66	70
7:00	99	415	21	64	64
8:00	157	415	22	60	57
9:00	223	553	23	55	52
10:00	498	618	24	50	47
11:00	490	666	25	46	44
12:00	620	626	25	38	43
13:00	614	587	26	37	45
14:00	423	473	26	39	48
15:00	160	257	26	39	53
16:00	61	129	25	44	59
17:00	38	88	25	49	65
18:00	7	30	24	51	71
19:00	0	13	18	78	78
20:00	0	9	18	82	83
21:00	0	6	18	78	88
22:00	0	0	18	78	90
23:00	0	0	18	79	90

Следует отметить, что результаты сравнения режимов работы СЭС, представленные в табл. 7 и 8, могут быть уточнены для различных углов наклона и азимута, поскольку эти параметры существенно влияют на объём поступающей солнечной радиации.

По результатам данных, полученных 7 апреля, можно установить, что уровень генерации энергии солнечной электростанцией был значительно выше, чем можно было бы ожидать только на основании прямой инсоляции. Этот эффект объясняется дополнительным вкладом отражённой солнечной радиации от снежного покрова, который увеличивает общий объём поступающей на поверхность солнечных панелей энергии. Установлено, что в условиях весны отражённая радиация может составлять значительную долю суммарной солнечной радиации, что подтверждается измерениями под различными углами наклона панелей.

На рис. 8 изображены условия работы СЭС 7 апреля. Снежный покров, расположенный под массивом СБ, способен отражать солнечную радиацию на поверхность фотоэлементов. Очевидно, что 15 июля основными отражающими поверхностями стали выступать брусчатка и газон, которые обладают гораздо более низкими коэффициентами отражения, чем снежный покров. Измерение отражённой солнечной радиации проводилось с помощью датчика радиации согласно схеме: на рис. 9 изображены углы наклона, при которых проводились измерения детектором солнечной радиации. Отражённая солнечная радиация фиксировалась в положениях детектора -90° и -45° .



Рис. 8. Условия проведения эксперимента 7 апреля 2023 г.

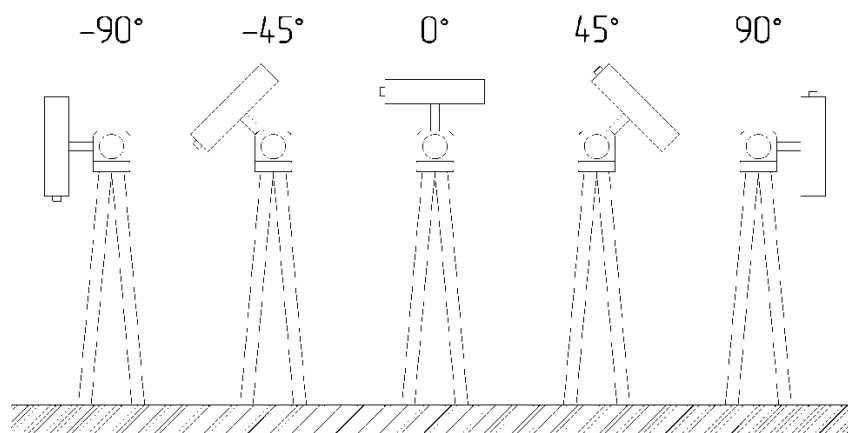


Рис. 9. Схема измерения солнечной радиации.

Результаты измерений солнечной радиации 7 апреля и 15 июля приведены в табл. 9 и 10.

Таблица 9

Результаты измерений солнечной радиации 7 апреля 2023 г.

Время	Солнечная радиация при различных углах наклона детектора, Вт/м ²				
	-90°	-45°	0°	-45°	90°
11:50	294	455	1047	998	599
13:30	317	500	1098	951	604

15:56	227	385	802	770	324
-------	-----	-----	-----	-----	-----

Таблица 10

Результаты измерений солнечной радиации 15 июля 2023 г.

Время	Солнечная радиация при различных углах наклона детектора, Вт/м ²				
	-90°	-45°	0°	45°	90°
12:50	95	96	341	1046	654

Результаты измерений показали, что в снежный период отражённая солнечная радиация составляет значительную долю суммарной радиации, зарегистрированной на поверхности панелей. Например, для углов наклона -90° и -45° уровень радиации от снежного покрова превышает значения от грунта. Это объясняется высоким коэффициентом отражения снежной поверхности.

Однако данные были получены на основе суммарных измерений радиации, без выделения её отдельных составляющих (прямой, рассеянной и отражённой). Для обоснованной оценки вклада отражённой радиации и точного влияния на выработку энергии планируется проведение дополнительных измерений, учитывающих пространственную ориентацию панелей, погодные условия и спектральный состав отражённого излучения.

Для повышения эффективности фотоэлектрических станций, функционирующих в условиях высоких широт, за счёт отражённой солнечной радиации рекомендуется размещать СБ на конструкциях каскадом вверх ближе к поверхности земли, до допустимых значений ветровой нагрузки на площадь массива СБ, под углом к земной поверхности, равным значению зенитного угла Солнца.

Для оценки экономической эффективности СЭС был произведён технико-экономический расчёт. Стоимость оборудования приведена в табл. 11.

Таблица 11

Стоимость оборудования СЭС

Оборудование	Количество, шт.	Стоимость, руб.
Поликристаллическая СБ, 200Вт, 24В	6	73 200
АКБ, 12В, 100Ач	8	104 000
Солнечный MPPT контроллер	1	40 900
Инвертор 6 кВт, 24В	1	89 900
Всего		308 000

Стоимость работы специалистов по установке оборудования оценивается в 20 % от стоимости монтируемого оборудования, что в данном случае составит 61 600 руб.

Для оценки экономической эффективности использования солнечной электростанции в условиях Архангельска были проанализированы данные о средней выработке электроэнергии по сезонам. Уровень инсоляции в высоких широтах варьируется в зависимости от времени года, поэтому расчёты средней годовой выработки энергии основывались на данных сезонной инсоляции, полученных в ходе эксперимента.

Среднесезонная выработка составила:

- зима (декабрь–февраль): 200 кВт·ч;

- весна (март–май): 1 200 кВт·ч;
- лето (июнь–август): 1 800 кВт·ч;
- осень (сентябрь–ноябрь): 800 кВт·ч.

Для каждого сезона была рассчитана средняя месячная выработка энергии, которая затем суммировалась для определения годового значения. Такой подход позволил учесть разницу в уровне инсоляции, характерную для высоких широт, где зимой продолжительность светового дня и уровень солнечной активности существенно ниже, чем летом. Итоговая годовая выработка составила 4 000 кВт·ч, что соответствует данным, полученным в ходе эксперимента.

Это значение было использовано для расчёта экономической эффективности вместо усреднённого значения, основанного на дневной выработке. Такой подход позволяет более точно учитывать влияние сезонных изменений инсоляции на экономические показатели.

С учётом этих данных и текущего тарифа на электроэнергию (6 руб. 59 коп. за 1 кВт·ч) годовая экономия составит 26 360 руб. Расчёты с учётом 20-летнего срока службы системы, роста тарифов на электроэнергию и затрат на замену компонентов показывают, что система окупается в течение срока эксплуатации, обеспечивая экономию около 12% от затрат на электроэнергию.

При расчёте тарифных ставок и, соответственно, годовой экономии денежных средств необходимо учитывать ставку дисконтирования, в качестве которой принимается средний ежегодный рост тарифа на электроэнергию для населения в г. Архангельске (8 %). Расчёт производится по формуле [15, Курякова Н., с. 73]:

$$FV = \sum_{n=1}^{20} PV \cdot (1 + i)^n \quad (1),$$

где FV — экономическая выгода от использования за расчётный период, приведённая к текущей стоимости;

PV — экономическая выгода в первый год службы, 23 065 руб.;

n — расчётный период, 20 лет;

i — средний рост тарифных ставок на электроэнергию в Архангельской области в год, 8%.

Из расчёта следует, что в течение 20 лет эксплуатации комплект солнечных батарей позволит сэкономить денежные средства в размере 1 055 500 руб.

По информации производителей оборудования, средний срок службы аккумуляторов составляет 9 лет, контроллера и инвертора — 14 лет. Соответственно, замена аккумуляторов будет произведена на 9-м и 18-м годах эксплуатации, а замена контроллера и инвертора на 14-м году эксплуатации. Уровень инфляции примем 4%. Затраты за замену вычислим по формуле [15, Курякова Н., с. 73]:

$$Z = Z_a \cdot (1 + i)^9 + Z_a \cdot (1 + i)^{18} + Z_{к/и} \cdot (1 + i)^{14} \quad (2),$$

где Z_a — затраты на замену аккумуляторов, 104 000 руб.;

$Z_{к/и}$ — затраты на замену контроллера и инвертора, 130 800 руб.;

i — уровень инфляции, 4%.

Итоговая экономическая эффективность использования солнечных батарей в качестве источника электрической энергии [15, Курякова Н., с. 73]:

$$R = FV - Z_{\text{пр}} - Z, \quad (3),$$

где FV — экономическая выгода при использовании солнечных батарей за расчётный период, приведённая к текущей стоимости, 1 055 500 руб.;

$Z_{\text{пр}}$ — затраты на приобретение комплекта солнечных батарей, 369 600 руб.;

Z — общие затраты на замену комплектующих, 585 212 руб.

Вычисления по вышеуказанной методике показали, что 20 лет эксплуатации оборудования, используемого для проведения эксперимента, приведут к экономии 100 687 руб. Данная сумма составляет порядка 10% от стоимости электроэнергии за расчётный период с учётом инфляции.

Заключение

В результате проведённого исследования параметров работы солнечной панели при различных метеоусловиях сделан вывод о наиболее эффективных месяцах применения данной установки. Для повышения эффективности СЭС в условиях северных широт требуется дальнейший анализ пространственной ориентации панелей и её влияния на выработку энергии. Стоит отметить, что именно в снежную погоду эффективность СЭС максимальна в связи с наличием отражённой солнечной радиации.

По итогам эксперимента была проведена оценка экономической эффективности использования СЭС в условиях Архангельска с учётом сезонной изменчивости инсоляции. Расчёты показали, что годовая выработка электроэнергии составляет около 4 000 кВт·ч, что учитывает различия в уровнях солнечной активности зимой, весной, летом и осенью. Такой подход обеспечивает более точное представление об эффективности системы в условиях высоких широт.

Экономическая выгода от использования СЭС в течение 20-летнего срока эксплуатации с учётом затрат на замену компонентов и роста тарифов на электроэнергию составит порядка 12% от общих затрат на электроэнергию за указанный период.

В дальнейшем планируется проведение исследований с более детальной учётной моделью, включающей влияние облачности, угла наклона панелей и других климатических факторов, чтобы ещё точнее оценить эффективность СЭС в различных условиях эксплуатации.

Список источников

1. Al-Okbi A., Vankov Y., Hussain H.M. A hybrid air conditioning system using solar energy to save electrical energy with improving performance // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 288. Art. 01066. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801066>
2. Upadhyay S., Sharma M.P. A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 38. Pp. 47–63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.057>

3. Renewable Energy for the Arctic: New Perspectives / Ed. by G. Arruda, F.M. Arruda. London: Routledge, 2018. 230 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781351173322>
4. Zhang X., Yang J., Fan Y., Zhao X., Yan R., Zhao J., Myers S. Experimental and analytic study of a hybrid solar/biomass rural heating system // *Energy*. 2020. Vol. 190. Art. 116392. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116392>
5. Padovani F., Sommerfeldt N., Longobardi F., Pearce J.M. Decarbonizing rural residential buildings in cold climates: A techno-economic analysis of heating electrification // *Energy and Buildings*. 2021. Vol. 250. Art. 111284. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111284>
6. Олейников А.М., Канов Л.Н. Математическое моделирование режимов работы гибридной электростанции // *Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE)*. 2020. № 34–36. С. 59–70. DOI: <https://doi.org/10.15518/isjaee.2020.34-36.059-070>
7. Gloeckler M., Sankin I., Zhao Z. CdTe Solar Cells at the Threshold to 20% Efficiency // *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2013. Vol. 3 (4). Pp. 1389–1393. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2013.2278661>
8. Ali N., Hussain A., Ahmed R., Wang M.K., Zhao C., Ul Haq B., Y.Q. Fu. Advances in nanostructured thin film materials for solar cell applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 59. Pp. 726–737. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.268>
9. Luo Y., Shi Y., Cai N. Bridging a bi-directional connection between electricity and fuels in hybrid multi-energy system // *Hybrid Systems and Multi-energy Networks for the Future Energy Internet*. Academic Press. 2021. Pp. 41–84. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819184-2.00003-1>
10. Pandey A., Tyagi V., Selvaraj J. A/L., Rahim N.A., Tyagi S.K. Recent advances in solar photovoltaic systems for emerging trends and advanced applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 53. Pp. 859–884. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.043>
11. Kafetzis A., Ziogou C., Panopoulos K.D., Papadopoulou S., Seferlis P., Voutetakis S. Energy management strategies based on hybrid automata for islanded microgrids with renewable sources, batteries and hydrogen // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 134. Art. 110118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110118>
12. Elmohlawy A.E., Kazanjan B.I., Ochkov V.F. Modeling and Performance prediction of solar parabolic trough collector for hybrid thermal power generation plant under different weather conditions // *AIP Conference Proceedings* 2018. Vol. 2047. Iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5081635>
13. Alramlawi M., Li P. Design Optimization of a Residential PV-Battery Microgrid with a Detailed Battery Lifetime Estimation Model // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2020. Vol. 56 (2). Pp. 2020–2030. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2965894>
14. Романов К.А. Исследование эффективности фотоэлектрических батарей в условиях крайнего севера // *Оригинальные исследования*. 2022. Т. 12. № 12. С. 243–254.
15. Курякова Н.Б., Панькова А.Н., Пупова А.С. Оценка эффективности применения альтернативных источников энергии на территории Пермского края // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. 2014. № 3 (15). С. 69–76.

References

1. Al-Okbi A., Vankov Y., Hussain H.M. A Hybrid Air Conditioning System Using Solar Energy to Save Electrical Energy with Improving Performance. *E3S Web of Conferences*, 2021, vol. 288, art. 01066. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801066>
2. Upadhyay S., Sharma M.P. A Review on Configurations, Control and Sizing Methodologies of Hybrid Energy Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 38, pp. 47–63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.057>
3. Arruda G., Arruda F.M., eds. *Renewable Energy for the Arctic: New Perspectives*. London, Routledge, 2018, 230 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781351173322>
4. Zhang X., Yang J., Fan Y., Zhao X., Yan R., Zhao J., Myers S. Experimental and Analytic Study of a Hybrid Solar/Biomass Rural Heating System. *Energy*, 2020, vol. 190, art. 116392. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116392>

5. Padovani F., Sommerfeldt N., Longobardi F., Pearce J.M. Decarbonizing Rural Residential Buildings in Cold Climates: A Techno-Economic Analysis of Heating Electrification. *Energy and Buildings*, 2021, vol. 250, art. 111284. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111284>
6. Olejnikov A.M., Kanov L.N. Mathematical Model Work Hybrid Power. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2020, no. 34–36, pp. 59–70. DOI: <https://doi.org/10.15518/isjaee.2020.34-36.059-070>
7. Gloeckler M., Sankin I., Zhao Z. CdTe Solar Cells at the Threshold to 20% Efficiency. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2013, vol. 3 (4), pp. 1389–1393. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2013.2278661>
8. Ali N., Hussain A., Ahmed R., Wang M.K., Zhao C., Ul Haq B., Y.Q. Fu. Advances in Nanostructured Thin Film Materials for Solar Cell Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 59, pp. 726–737. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.268>
9. Luo Y., Shi Y., Cai N. Bridging a Bi-Directional Connection between Electricity and Fuels in Hybrid Multienergy System. In: *Hybrid Systems and Multi-energy Networks for the Future Energy Internet*. Academic Press, 2021, pp. 41–84. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819184-2.00003-1>
10. Pandey A., Tyagi V., Selvaraj J. A/L., Rahim N.A., Tyagi S.K. Recent Advances in Solar Photovoltaic Systems for Emerging Trends and Advanced Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 53, pp. 859–884. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.043>
11. Kafetzis A., Ziogou C., Panopoulos K.D., Papadopoulou S., Seferlis P., Voutetakis S. Energy Management Strategies Based on Hybrid Automata for Islanded Microgrids with Renewable Sources, Batteries and Hydrogen. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, vol. 134, art. 110118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110118>
12. Elmohlawy A.E., Kazanjan B.I., Ochkov V.F. Modeling and Performance Prediction of Solar Parabolic Trough Collector for Hybrid Thermal Power Generation Plant under Different Weather Conditions. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2047, iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5081635>
13. Alamlawi M., Li P. Design Optimization of a Residential PV-Battery Microgrid with a Detailed Battery Lifetime Estimation Model. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, vol. 56 (2), pp. 2020–2030. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2965894>
14. Romanov K.A. Investigation of the Efficiency of Photovoltaic Batteries in the Far North. *Original Research Journal*, 2022, vol. 12, no. 12, pp. 243–254.
15. Kryukova N.B., Pankova A.N., Pupova A.S. Evaluation of the Effectiveness of Alternative Energy Sources on the Territory of Perm Region. *PNRPU Bulletin. Urban Development*, 2014, no. 3 (15), pp. 69–76.

Статья поступила в редакцию 11.11.2024; одобрена после рецензирования 19.12.2024;
принята к публикации 28.01.2025

Вклад авторов: все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов