

ЭНЕРГЕТИКА - ENERGY

УДК 621.311.243:551.521(575.3)

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ СОЛНЕЧНОЙ ИНСОЛЯЦИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ЮГА ТАДЖИКИСТАНА**И.Б. Махсумов, Д.Т. Исозода, А.Н. Давлатзода**

Институт энергетики Таджикистана

В условиях высокой солнечной активности в Хатлонской области актуальным становится повышение эффективности фотоэлектрических систем. Целью исследования является оценка влияния изменчивости солнечного излучения и температуры на выходную мощность солнечных панелей. Эксперимент проводился на автономной солнечной электростанции мощностью 10 кВт с использованием люксметра и инфракрасного термометра для замеров инсоляции и температуры. Проведён корреляционный анализ, подтвердивший прямую зависимость между уровнем инсоляции и выходной мощностью, а также выявлено влияние температуры на снижение эффективности. Результаты демонстрируют выраженные суточные и сезонные колебания солнечной радиации, оказывающие существенное влияние на генерацию электроэнергии. Практическая значимость работы заключается в выработке рекомендаций по размещению, ориентированию и эксплуатации солнечных установок для повышения их производительности в условиях Таджикистана.

Ключевые слова: возобновляемая энергия, фотоэлектрические системы, солнечное излучение, выходная мощность, эффективность ФЭ-систем.

ТАЪСИРИ ТАҒЙИРӢБИ АФКАНИШОТИ ОҒТОБӢ (ИНСОЛЯЦИЯ) БА САМАРАНОКИИ СИСТЕМАҲОИ ФОТОЭЛЕКТРИКӢ ДАР ШАРОИТИ ЧАНУБИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН**И.Б. Махсумов, Д.Т. Исозода, А.Н. Давлатзода**

Дар шароити ғаҷолиятнокии баланди оғтобӣ дар вилояти Хатлон масъалаи баланд бардоштани самаранокии системаҳои фотоэлектрикӣ аҳамияти махсус касб мекунад. Ҳадафи таҳқиқот баҳо додан ба таъсири тағйирёбии афканишоти оғтобӣ ва ҳарорат ба иқтидори истеҳсоли панелҳои оғтобӣ мебошад. Таҳқиқот дар нерӯгоҳи автономии оғтобӣ бо иқтидори 10 кВт гузаронида шуд, ки барои ченкунии сатҳи афканишоти аз люксметр ва барои ченкунии ҳарорат аз термометри инфрасурх истифода гардид. Таҳлили коррелясионӣ гузаронида шуда, вобастигии мустақим миёни сатҳи афканишот ва иқтидори истеҳсолӣ тасдиқ гардид, инчунин таъсири манфии ҳарорат ба коҳиши самаранокӣ муайян карда шуд. Натиҷаҳо мавҷудияти тағйироти рӯзона ва мавсимии афканишоти оғтобиро нишон медиҳанд, ки ба таълифи нерӯи барқ таъсири назаррас мерасонанд. Аҳамияти амалии таҳқиқот дар таҳияи тавсияҳо оид ба ҷойгиркунии, самтгирӣ ва истифодабарии системаҳои оғтобӣ барои баланд бардоштани самаранокии онҳо дар шароити Ҷумҳурии Тоҷикистон ифода меёбад.

Калимаҳои калидӣ: энергияи барқароршаванда, системаҳои фотоэлектрикӣ, афканишоти оғтобӣ (инсоляция), иқтидори истеҳсолӣ, самаранокии системаҳои фотоэлектрикӣ.

INFLUENCE OF SOLAR INSOLATION VARIABILITY ON THE EFFICIENCY OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN THE CONDITIONS OF SOUTHERN TAJIKISTAN**I.B. Makhsumov, D.T. Isozoda, A.N. Davlatzoda**

Under the conditions of high solar activity in the Khatlon region, improving the efficiency of photovoltaic systems becomes particularly relevant. The aim of this study is to evaluate the impact of solar irradiance variability and temperature on the output power of solar panels. The experiment was conducted at a 10 kW autonomous solar power plant using a lux meter and an infrared thermometer to measure insolation and temperature. A correlation analysis was performed, confirming a direct relationship between the level of insolation and output power, as well as identifying the negative influence of temperature on efficiency. The results demonstrate pronounced daily and seasonal fluctuations of solar radiation, which significantly affect electricity generation. The practical significance of this work lies in the development of recommendations on the placement, orientation, and operation of solar installations to improve their performance under the conditions of Tajikistan.

Keywords: renewable energy, photovoltaic systems, solar irradiance, output power, efficiency of photovoltaic systems.

Введение

Фотоэлектрические (ФЭ) системы, или системы солнечной энергетики, играют ключевую роль в переходе к устойчивым энергетическим решениям. Они основаны на прямом преобразовании солнечного излучения в электрическую энергию посредством фотоэлектрического эффекта, что позволяет использовать чистый, возобновляемый и практически неисчерпаемый источник энергии. Основу ФЭ-систем составляют полупроводниковые элементы фотоэлектрические модули, чаще всего изготовленные из кремния. Эти элементы поглощают солнечный свет и генерируют электрический ток. Для повышения мощности несколько модулей объединяются в фотоэлектрические массивы [1-2]. Процесс начинается с попадания солнечного света на поверхность фотоэлементов, что вызывает возбуждение электронов в полупроводниковом материале и создаёт электрический ток. Благодаря отсутствию движущихся частей, работа ФЭ-систем сопровождается минимальным уровнем шума, высокой надёжностью, продолжительным сроком службы и низкими эксплуатационными затратами [3].

Климатические факторы, такие как температура воздуха, относительная влажность и солнечная облучённость, оказывают значительное влияние на эффективность работы фотоэлектрических (ФЭ) систем. Особенно важным параметром является уровень солнечного излучения основного источника энергии для

фотоэлементов, который изменяется в зависимости от погодных условий, времени суток, сезона и географического положения установки. Эти изменения носят как кратковременный, так и сезонный характер, что вызывает колебания выходной мощности и может снижать общую эффективность системы. Повышенная температура, например, снижает напряжение на выходе солнечных модулей, что приводит к падению выработки электроэнергии. Поэтому точное понимание и учёт изменчивости солнечного ресурса и сопутствующих климатических факторов являются важнейшими условиями для оптимального проектирования, эксплуатации и управления ФЭ-системами [1, 4].

Горные районы Центральной Азии, включая Таджикистан, характеризуются высокой изменчивостью солнечного излучения, проявляющейся в сложной сезонной и суточной динамике. Эти особенности одновременно создают как определённые вызовы, так и значительные перспективы для эффективного внедрения фотоэлектрических (ФЭ) технологий [3, 5-7]. Несмотря на широкое распространение солнечных энергетических установок, вопрос влияния переменности солнечной радиации на их эксплуатационную эффективность остаётся недостаточно изученным, особенно в контексте конкретных географических регионов, таких как Хатлонская область Республики Таджикистан. Солнечное излучение, подверженное влиянию атмосферных условий, демонстрирует значительную временную и пространственную нестабильность, что напрямую отражается на выходной мощности и производительности ФЭ-систем [2, 8].

Недостаток детальных эмпирических исследований, фокусирующихся в условиях Таджикистана, существенно затрудняет надёжное проектирование, эффективную эксплуатацию и оптимальное управление солнечными энергетическими установками в регионе. В связи с изложенными проблемами возникает насущная необходимость в проведении целенаправленных исследований, направленных на систематическое изучение влияния изменчивости солнечного излучения на производительность фотоэлектрических систем в условиях Хатлонской области Республики Таджикистан.

Актуальность такого исследования обусловлена как недостаточной эмпирической базой, так и растущей потребностью в устойчивых источниках энергии в регионе. Полученные результаты могут существенно способствовать развитию технологий солнечной энергетики в Таджикистане, обеспечивая основу для проектирования более эффективных конструкций ФЭ-систем, выбора оптимальных компонентов, а также выработки стратегий управления, направленных на повышение энергетической отдачи, надёжности и общей эффективности функционирования солнечных установок.

Авторы статьи [9] исследовали влияние температуры окружающей среды, интенсивности солнечного потока и относительной влажности на эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую. Результаты показали прямую зависимость выходного тока и эффективности системы от величины солнечного потока. Воздействие относительной влажности на ток и эффективность оказалось сопоставимым по степени влияния. Кроме того, было установлено, что температура солнечной панели определяется главным образом интенсивностью солнечного излучения, тогда как температура окружающей среды оказывает лишь косвенное и менее значительное воздействие. Постоянно относительно равномерный световой день и высокая высота над уровнем моря на протяжении года способствуют усилению солнечной радиации, обогащённой протонами.

В исследовании работы [10] рассматривалось влияние солнечного излучения и температуры окружающей среды на электрические характеристики фотоэлектрических модулей. Используя как теоретические, так и экспериментальные подходы, авторы проанализировали изменения тока, напряжения, выходной мощности и эффективности модулей под воздействием различных климатических условий. Эксперименты проводились в университете Сохара (Султанат Оман) с использованием монокристаллического фотоэлектрического модуля мощностью 50 Вт как в лабораторных, так и в уличных условиях. Результаты показали, что при увеличении солнечного излучения напряжение возрастает значительно (с 0,16 В до 19,92 В), тогда как ток изменяется лишь незначительно (с 0,153 А до 0,167 А). В то же время повышение температуры окружающей среды оказывает противоположное влияние, снижая напряжение, что, в свою очередь, отрицательно сказывается на мощности, энергии и общей эффективности модуля. Также авторы статьи [11] в своем исследовании сосредоточились на проблеме экстремальных условий солнечного излучения и их влияния на генерацию электроэнергии с помощью фотоэлектрических систем. В рамках их исследования были проанализированы последствия как устойчиво высокой, так и пониженной освещённости, используя глобальные климатические модели. Полученные данные позволили выявить значительное влияние экстремальной изменчивости солнечного излучения на эффективность и надёжность ФЭ-систем. Авторы подчёркивают необходимость разработки устойчивых к таким колебаниям систем, способных адаптироваться к экстремальным погодным условиям [12].

Научная новизна исследования заключается в проведении комплексного экспериментального анализа влияния изменчивости солнечной инсоляции и температуры окружающей среды на выходную мощность фотоэлектрических систем в условиях юга Таджикистана. В отличие от большинства предыдущих работ,

данное исследование основано на эмпирических данных, полученных непосредственно в Хатлонской области, что позволяет учесть региональные климатические особенности. Полученные результаты восполняют существующий дефицит прикладной информации по эксплуатационной эффективности солнечных установок в данной географической зоне и могут служить основой для адаптации проектных решений к местным условиям.

Целью данного исследования является оценка влияния изменчивости солнечного излучения на выходную мощность фотоэлектрических систем в климатических условиях Хатлонской области Таджикистана. Исследование направлено на выявление корреляции между солнечной инсоляцией, температурой окружающей среды и эффективностью работы ФЭ-систем. Также ставилась задача определения факторов, способствующих оптимизации работы солнечных установок в условиях высокой солнечной активности и сезонных колебаний.

Материалы и методы

Место исследования

Исследование проводилось на территории Института энергетики Таджикистана, расположенного в городе Бохтар Хатлонской области на юге Республики Таджикистан (координаты: 37,883° с. ш., 68,731° в. д.; см. рис. 1). Регион характеризуется континентальным климатом с жарким, сухим летом и мягкой зимой, а также высоким уровнем солнечной активности на протяжении большей части года. Понимание климатических и погодных условий Хатлонской области имеет ключевое значение для анализа изменчивости солнечного излучения и оценки его влияния на выходную мощность фотоэлектрических установок (ФЭУ).



Рисунок 1 – Географическое расположение экспериментальной установки в Хатлонской области, Республика Таджикистан (г. Бохтар; координаты: 37.84° с. ш., 68.78° в. д.)

Экспериментальное исследование было проведено на автономной солнечной электростанции мощностью 10 кВт, расположенной на базе Института энергетики Таджикистана. Для определения уровня солнечного излучения использовался цифровой люксметр MS6610, а в качестве датчика температуры поверхности солнечного модуля применялся инфракрасный термометр IR01D. В качестве нагрузки использовались три последовательно соединённые галогеновые лампы МАЯК 12V/60/80W. Для измерения электрических параметров модулей применялся цифровой мультиметр типа CHY Victor VC890D [13].

Эксперименты проводились с 5 по 10 апреля 2024 года, в начале пыльного сезона, который влияет на проникновение отдельных участков солнечного спектра к поверхности фотоэлементов, вызывая изменчивость солнечного излучения для фотоэлектрического модуля. Измерения выполнялись ежедневно в период с 11:00 до 16:00, что соответствует пиковому интервалу солнечной активности.

Для количественной оценки взаимосвязи между уровнем солнечной инсоляции, температурой и выходной мощностью фотоэлектрической установки использовались методы математической статистики и корреляционного анализа. Основным показателем зависимости служил коэффициент корреляции Пирсона (r), который позволяет установить степень линейной зависимости между переменными. Значения коэффициента интерпретировались по стандартной шкале:

- от 0,0 до 0,3 – слабая связь,
- от 0,3 до 0,7 – умеренная,

➤ свыше 0,7 – сильная положительная корреляция.

Анализ проводился на основе усреднённых данных за каждый день измерений (с 5 по 10 апреля 2024 года), включая значения инсоляции (Вт/м^2), температуры панели ($^{\circ}\text{C}$) и выходной мощности (кВт). Все измерения повторялись не менее трёх раз в течение дня, с последующим усреднением значений для повышения надёжности результатов.

Оценка точности результатов проводилась с использованием стандартного отклонения, а также расчёта 95 % доверительных интервалов. Погрешность измерений по инсоляции (прибор MS6610) не превышала $\pm 3\%$, по температуре (датчик IR01D) $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$, по напряжению и току (мультиметр VC890D) в пределах $\pm 0,5\%$. При необходимости величины были скорректированы с учётом поправочных коэффициентов, предусмотренных техническими паспортами приборов.

Дополнительно для расчёта выходной мощности и суточной генерации использовались уравнения:

$$P = U \cdot I \quad (1)$$

где

P – мгновенная выходная мощность (Вт),

U – измеренное напряжение на клеммах панели (В),

I – измеренный ток нагрузки (А).

Собранные данные были проанализированы для определения коэффициента корреляции между температурой, облучением и эффективностью фотоэлектрической системы. Солнечные панели были установлены под углом наклона 45° с ориентацией на юго-запад с отклонением 12° по горизонтали, так чтобы их поверхность была направлена к солнцу. Установка размещалась на платформе высотой 1,5 метра над уровнем земли. Технические характеристики используемых панелей представлены в таблице 1, а электрическая схема экспериментальной установки, предназначенная для изучения влияния солнечного излучения на выходную мощность фотоэлектрических панелей, изображена на рисунке 2.

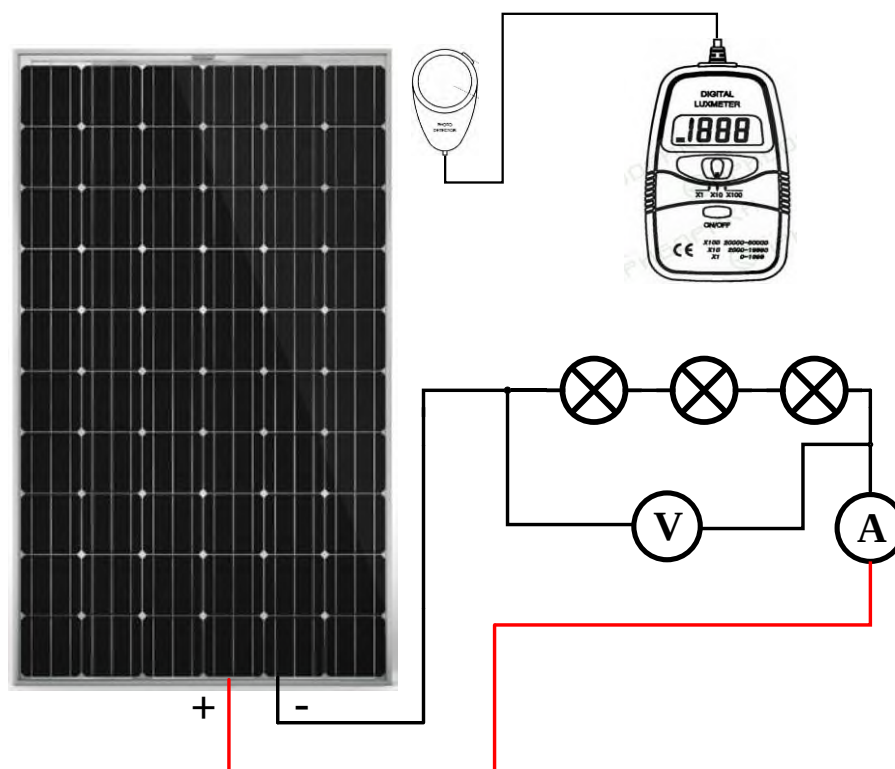


Рисунок 2 – Электрическая схема экспериментальной установки, размещённой на территории Института энергетики Таджикистана (г. Бохтар, 37.883° ш.ш., 68.731° в.д.)

Таблица 1 - Технические характеристики фотоэлектрического модуля типа SOLARMODUL ALEO S19 HE 300W Supercharged

Технические параметры	Обозначение	Значение параметров
Пиковая электрическая мощность	P_{max}	300 Вт
Напряжение в точке максимальной мощности	U_{mp}	31,2 В
Ток в точке максимальной мощности	I_{mp}	9,63 А
Ток короткого замыкания	I_{sc}	9,97 А
Напряжение холостого хода	U_{oc}	39,4 В
Температурный коэффициент по току	K_I	+0,05%/К
Температурный коэффициент по напряжению	K_u	-0,29%/К
КПД фотоэлектрического модуля	η	16,7%
Размер	ДхШхВ	1660 x 990 x 50 мм
Стандартные условия испытаний	(STC)	1.000W/м ² ; АМ 1,5; 25 °С
Количество ячеек	(10x6)	60
Масса	1 штук	20 кг

Измерение солнечного излучения (датчики): Данный компонент используется для измерения количества солнечной радиации, достигающей поверхности Земли в месте проведения эксперимента на территории Института энергетики Таджикистана. Обычно для этих целей применяются пиранометры или датчики освещённости на основе кремния, способные измерять глобальное горизонтальное облучение (GHI), включающее как прямую, так и рассеянную составляющие солнечной радиации. В рамках данного исследования использовался люксметр, а полученные данные в единицах освещённости (люксы) были преобразованы в значения солнечной инсоляции. Полученная информация необходима для установления корреляции между уровнем солнечного излучения и выходной мощностью фотоэлектрических систем.

Фотоэлектрические панели: Фотоэлектрические панели являются ключевыми элементами системы, предназначенными для преобразования солнечной энергии в электрическую. Они состоят из множества полупроводниковых элементов, как правило, на основе кремния, и работают на принципе фотоэлектрического эффекта, преобразуя солнечное излучение в электрический ток постоянного направления. В данном исследовании основное внимание уделяется оценке производительности панелей при различных уровнях солнечного излучения.

Математическое описание параметров фотоэлектрической панели: Температурная зависимость материала солнечной панели описывается температурным коэффициентом. Этот коэффициент отражает, как изменяется выходное напряжение (или мощность) панели при изменении температуры. Общее уравнение для оценки выходного напряжения фотоэлектрической панели при заданной температуре выражается следующим образом:

$$V_{\text{тем.коэф}} = T_{\text{коэф}} \times (T_{\text{stc}} - T + V_{\text{xx}}) \quad (2)$$

Где V_{xx} – напряжение холостого хода (разомкнутой цепи), которое в данной установке составляет 24 В;
 T_{STC} – температура при стандартных условиях испытаний (STC), равная 25 °С при уровне солнечного излучения 1000 Вт/м²;

$T_{\text{коэф}}$ – температурный коэффициент;

T – фактическая температура панели в месте проведения измерений (в °С).

Каждая солнечная панель обладает собственным температурным коэффициентом, который показывает, на сколько снижается напряжение при каждом градусе превышения стандартной температуры испытаний. Таким образом, влияние температуры на эффективность работы фотоэлектрической панели может быть рассчитано с использованием температурного коэффициента, что позволяет прогнозировать потери в выходной мощности при изменении климатических условий.

$$P_t = P_{st} \times [1 + a(T_c - T_s)] \quad (3)$$

Здесь

P_t – мощность при температуре T_c ;

P_{st} – мощность при стандартных условиях испытаний (обычно 25°C);

α – Температурный коэффициент панелей;

T_c – рабочая температура панелей в °C;

T_s – стандартная температура тестирования (обычно 25 °C).

Влияние солнечного излучения: Суточная выработка энергии.

$$E_d = A \times G_d \times \eta \quad (4)$$

E_d – Суточная выработка энергии (Вт·ч или кВт);

A – Площадь солнечных панелей (м²);

G_d – Суточная солнечная освещенность (Вт/м²);

η – Эффективность фотоэлектрической системы.

Комплексный подход к измерениям и статистической обработке данных позволил повысить достоверность выводов и обеспечить объективность анализа влияния климатических факторов на эффективность фотоэлектрических установок.

Результаты и обсуждение

На графике (рис.3) представлена зависимость выходной мощности (кВт) от солнечной инсоляции (Вт/м²) за шесть последовательных дней с 5 по 10 апреля 2024 года. Проведённые исследования за период с 5 по 10 апреля 2024 года позволили установить характер зависимости между уровнем солнечной инсоляции и выходной мощностью фотоэлектрической установки. Анализ полученных данных показал, что повышение инсоляции сопровождается увеличением выходной мощности, что указывает на прямую корреляцию между этими параметрами.

На начальном этапе эксперимента (05-06.04.2024) при умеренной инсоляции (310-317 Вт/м²) была зафиксирована стабильная генерация энергии в пределах 4,128-4,647 кВт. Однако 07.04.2024 резкое снижение инсоляции до 143 Вт/м² вызвало ощутимое падение мощности до 2,872 кВт, что подчёркивает высокую чувствительность системы к уменьшению уровня солнечного излучения.

Интересно отметить, что уже 08.04.2024 при восстановлении инсоляции до 300 Вт/м² выходная мощность возросла до 4,868 кВт. Это значение превышает ожидаемое при такой освещённости, что, вероятно, обусловлено временными улучшениями погодных условий, изменением угла солнечного излучения или повышенной эффективностью работы системы в данных условиях.

Максимальные показатели были зафиксированы 09.04.2024: инсоляция достигла 444 Вт/м², а мощность 5,644 кВт. Это подтверждает, что пик генерации электроэнергии приходится на дни с наибольшей солнечной активностью. В то же время незначительное снижение инсоляции до 406 Вт/м² на следующий день (10.04.2024) привело к снижению выходной мощности лишь до 5,057 кВт, что также свидетельствует об устойчивости системы. В целом, выявлена устойчивая закономерность: увеличение солнечной инсоляции приводит к росту выходной мощности фотоэлектрической установки. Исключением стал день 08.04.2024, при котором зафиксировано отклонение от общей тенденции. Это указывает на наличие дополнительных факторов, способных оказывать влияние на эффективность генерации, включая погодные условия, чистоту поверхности солнечных панелей, их ориентацию и техническое состояние системы.

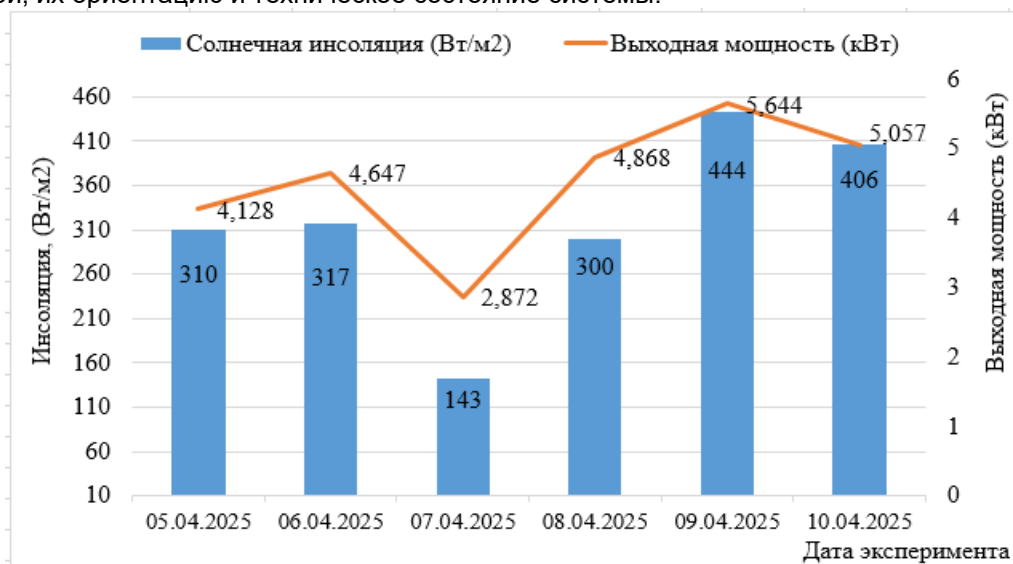


Рисунок 3 – Зависимость выходной мощности фотоэлектрической установки от изменчивости солнечной инсоляции в период исследования для Хатлонской области

Таким образом, можно заключить, что солнечная инсоляция является основным, но не единственным параметром, определяющим уровень выработки электроэнергии. Для достижения максимальной эффективности работы фотоэлектрических систем необходимо учитывать весь комплекс внешних и эксплуатационных факторов.

Также на основе данных о солнечной инсоляции, полученных из базы Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), [14] было построено суточное распределение солнечной инсоляции (Вт/м^2) по каждому месяцу года для города Бохтар (Республика Таджикистан) (рис. 4). График иллюстрирует изменение интенсивности солнечного излучения в течение суток (с 1:00 до 24:00) для всех двенадцати месяцев, что позволяет наглядно оценить, как суточную, так и сезонную динамику инсоляции.

Максимальные значения инсоляции наблюдаются в летние месяцы июнь и июль. В эти периоды солнечное излучение достигает пиковых значений около 1000 Вт/м^2 в полуденные часы (12:00–13:00), при этом продолжительность светового дня значительно увеличивается: инсоляция начинается около 6:00 и спадает только к 19:00. Это обеспечивает наибольший энергетический потенциал для солнечных установок.

В переходные месяцы март, апрель, сентябрь и октябрь наблюдаются умеренные уровни инсоляции (с пиками около $700\text{--}800 \text{ Вт/м}^2$), при этом форма суточных кривых остаётся симметричной и близкой к летним. Это говорит о высокой солнечной активности даже при сокращённом световом дне.

Минимальные значения инсоляции зафиксированы в зимние месяцы декабрь, январь и февраль, когда солнечное излучение не превышает $500\text{--}600 \text{ Вт/м}^2$. Продолжительность освещённого периода ограничивается интервалом примерно с 8:00 до 17:00, что обусловлено низким углом падения солнечных лучей и коротким днём.

Полученные результаты подтверждают выраженную сезонную динамику солнечной инсоляции в Хатлонской области: максимальная генерация энергии наблюдается в летние месяцы, тогда как зимой энергетический потенциал значительно снижается. Эти данные представляют практическую ценность для расчёта годовой выработки электроэнергии, а также для рационального проектирования, размещения и оптимизации фотоэлектрических систем в условиях региона.

Полученные результаты согласуются с выводами авторов [8-10], которые также установили прямое влияние уровня солнечного излучения на эффективность работы солнечных панелей. Например, в работе [10], выполненной в условиях Омана, продемонстрировано существенное увеличение напряжения и выходной мощности при росте инсоляции, аналогично тому, что наблюдалось в условиях Таджикистана. Работа [11, 15-17] подчёркивает значительное влияние экстремальных температур, что также подтверждается в настоящем исследовании: повышение температуры сопровождается снижением напряжения и мощности, однако при высокой инсоляции этот эффект частично компенсируется.

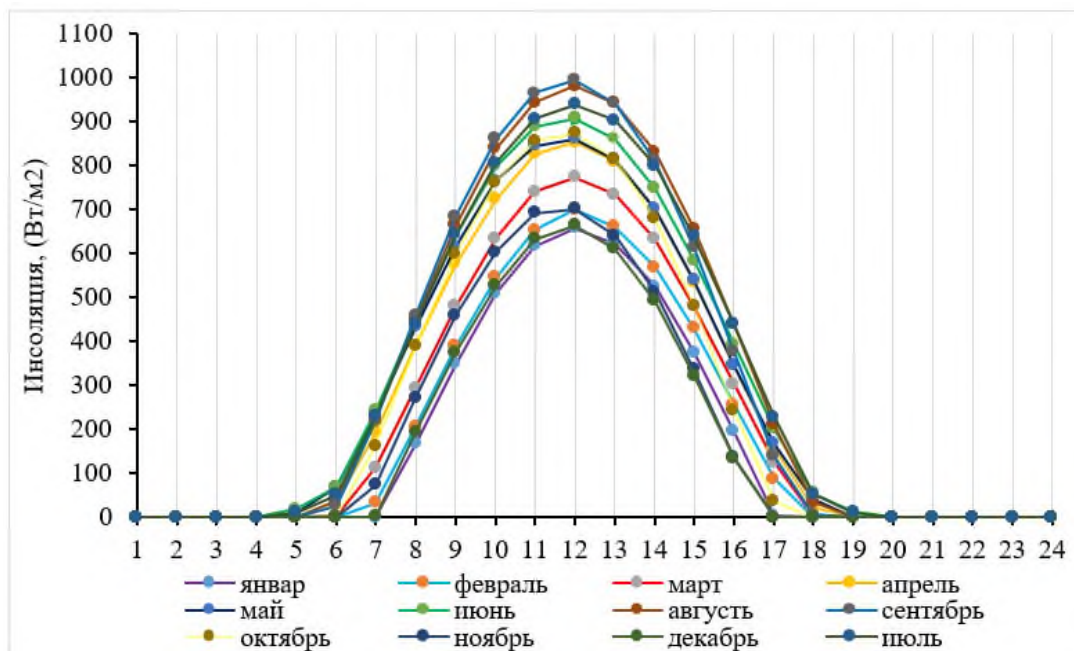


Рисунок 4 – Суточное распределение солнечной инсоляции в различные месяцы года для города Бохтар, ХО

Некоторые отклонения от общей зависимости могут быть обусловлены внешними факторами: облачностью, пылью, загрязнением панелей, а также техническими погрешностями приборов. Кроме того, ограниченность периода измерений (6 дней) не позволяет полностью охватить весь спектр сезонной изменчивости, что следует учитывать при интерпретации данных.

Практическая значимость результатов состоит в том, что корректный учёт суточной и сезонной изменчивости солнечного ресурса необходим для эффективного проектирования и эксплуатации ФЭ-систем в южных районах Таджикистана. Полученные зависимости могут быть применимы и в других регионах Центральной Азии с аналогичными климатическими условиями. Для повышения точности рекомендуется проведение более длительных полевых исследований и внедрение автоматизированных систем мониторинга солнечной активности и температуры окружающей среды.

Заключение

Проведённое экспериментальное исследование подтвердило наличие устойчивой положительной корреляции между уровнем солнечной инсоляции и выходной мощностью фотоэлектрических систем в климатических условиях Хатлонской области. Установлено, что наибольшая выработка электроэнергии достигается при высокой инсоляции и умеренных температурах окружающей среды. Несмотря на то что повышение температуры снижает эффективность солнечных модулей, этот эффект частично компенсируется увеличением потока солнечной энергии.

На основании полученных результатов разработаны следующие прикладные рекомендации для повышения эффективности эксплуатации фотоэлектрических систем в южных регионах Таджикистана:

1. Оптимальный угол наклона панелей должен составлять 30-35° в весенне-летний период и до 45° в зимние месяцы, с ориентацией на юг-юго-запад, что обеспечит максимальный приём солнечной радиации в течение года.

2. Регулярное обслуживание фотоэлектрических модулей, включая очистку от пыли и загрязнений не реже одного раза в неделю, особенно в пыльный сезон (апрель-июнь), существенно повышает эффективность установки.

3. Планирование генерации должно учитывать сезонные и суточные колебания инсоляции наиболее продуктивный период с 11:00 до 15:00 и месяцы с мая по август.

4. Учет климатических особенностей региона при проектировании: целесообразно использовать модули с низким температурным коэффициентом и усиленной вентиляцией задней поверхности панели.

Ограничения исследования заключаются в краткосрочном характере эксперимента (6 дней в апреле), что не позволяет охватить полный сезонный цикл инсоляции и температурных изменений. Кроме того, применялись панели и оборудование одного типа, что ограничивает масштабируемость результатов на все классы солнечных модулей.

Полученные данные могут быть использованы как основа для разработки региональных стратегий по интеграции солнечной генерации в локальные энергосистемы, а также для оптимизации проектных решений при строительстве новых объектов солнечной энергетики в условиях Центральной Азии.

Рецензент: Киргизов А.К. — к.т.н., доцент кафедры «Электрические станции» ТИЭУ имени академика М.С. Осими

Литература

1. Almashary B., Telba A. Effect of high temperature to output power of solar cell // Proceedings of the World Congress on Engineering 2018. Vol. I. London, U.K., July 4–6, 2018. – IAENG, 2018.
2. Buni, M. J. B., Al-walie, A. A. K., & Al-asadi, K. A. N. (2018). Effect of Solar Radiation on Photovoltaic Cell. 3(3), 47–51.
3. Ibrahim, K. A., Gyuk, P. M., & Aliyu, S. (2019). The effect of solar irradiation on solar cells. 14(1), 20–22.
4. Dajuma A., Saleye Y., Siaka T., Arona D., Rabani A., Abdourahamane K., Mariama S., and Michel G. (2016) Sensitivity of Solar Photovoltaic Panel Efficiency to Weather and Dust over West Africa: Comparative Experimental Study between Niamey (Niger) and Abidjan (Côte d'Ivoire). Computational Water, Energy, and Environmental Engineering, 5, 123-147. <http://dx.doi.org/10.4236/cweee.2016.54012>.
5. Lohmann, G. M., Monahan, A. H., & Heinemann, D. (2016). Local short-term variability in solar irradiance. January, 1–23. <https://doi.org/10.5194/acp-2016-2>
6. Mohammad, A. T., & Shohani, W. A. M. Al. (2022). and experimental investigation for analyzing the temperature influence on the performance of photovoltaic module. 10(April), 1026–1045. <https://doi.org/10.3934/energy.2022047>
7. Muhammad S., and Abdulmumin S. (2022). Effect of Temperature on the Performance of Photovoltaic Module. International Journal of Innovative Science and Research Technology. 5(9).
8. Omubo-Pepple V.B., C. Israel-Cookey and G. I. Alaminokuma (2009). Effects of Temperature, Solar Flux and Relative Humidity on the Efficient Conversion of Solar Energy to Electricity. European Journal of Scientific Research. 35(2), 173-180.

9. Reem Abdullah Musabah Al-Badi, and Hussein A Kazem, (2022). Solar irradiance and ambient temperature effect on photovoltaic electrical performance. The first international conference on: Environmental science and engineering for sustainable development.

10. Senger, G., Chtirkova, B., Folini, D., Wohland, J., & Wild, M. (2024). Persistent extreme surface solar radiation and its implications on solar photovoltaics. *Earth's Future*, 12, e2023EF004266.

11. Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б., Шестакова В.В. Снижение генерации электрической энергии солнечными модулями в условиях запыленности местности // *iPolytech Journal*. 2023. Т. 27. № 1.С. 83–93. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-83-93>.

12. Omoriare et al: Investigating the Influence of Solar Irradiance Variability on the Output Power of Photovoltaic (PV) Systems in Akure, Nigeria <https://dx.doi.org/10.4314/wojast.v16i1.18>

13. PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM [Электронный ресурс]. 2025. – URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#api_5.2 (дата обращения: 08.06.2025).

14. I. M. Kirpichnikova, K. Sudhakar, I. B. Makhsumov, A. S. Martyanov, and S. Shanmuga Priya, “Thermal model of a photovoltaic module with heat-protective film,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 30, Feb. 2022, Art. no. 101744, doi: 10.1016/j.csite.2022.101744.

15. Киргизов А.К., Ниезй С.Р., Довудов С.У. Интеграция возобновляемых источников энергии в электрическую сеть // *Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования*. – 2025. – № 2(70). – С. 14–20.

16. Махсумов И.Б. Влияние деградации и высокой температуры воздуха на энергетическую эффективность солнечных модулей (литературный анализ) // *Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования*. – 2023. – № 3(63). – С. 22–28.

17. Махсумов И.Б., Ниези С.Р., Вохидов М.М. Разработка и методология расчета системы солнечной энергетической генерации для бытового применения // *Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования*. – 2022. – № 3(59). – С. 26–32.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ - INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Махсумов Илҳом Бурҳонович	Махсумов Илхом Бурхонович	Makhsumov Ilkhom Burkhonovich
н.и.т., дотсент, мудири кафедраи манбаҳои алтернативии энергия	к.т.н., доцент, зав. кафедрой “Альтернативные источники энергии”	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Alternative Energy Sources
Донишқадаи энергетикӣ Тоҷикистон	Институт энергетикӣ Таджикистана	Tajik Power Engineering Institute
E.mail: messi.ilhom@gmail.com		
TJ	RU	EN
Исозода Диловаршоҳ Тарик	Исозода Диловаршоҳ Тарик	Isozoda Dilovarshoh Tarik
д.и.т., дотсент, ректори ДЭТ	д.т.н., доцент, ректор ИЭТ	Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Rector of the Tajik Power Engineering Institute
Донишқадаи энергетикӣ Тоҷикистон	Институт энергетикӣ Таджикистана	Tajik Power Engineering Institute
E.mail: isoev-d@mail.ru		
TJ	RU	EN
Давлатзода Абуфазл Нусратулло	Давлатзода Абуфазл Нусратулло	Davlatzoda Abufazl Nusratullo
унвонҷӯи ДЭТ	соискатель ИЭТ	applicant of the Tajik Power Engineering Institute
Донишқадаи энергетикӣ Тоҷикистон	Институт энергетикӣ Таджикистана	Tajik Power Engineering Institute
E.mail: davlatzoda_88@mail.ru		