



O'ZBEKISTON HUDUDIDA KUNDUZGI MANFIY HARORATLAR DAVOMIYLIGI ASOSIDA FOTOELEKTRIK MODULLAR FRONTAL YUZASIDA MUZ HOSIL BO'LISH XAVFINI BAHOLASH

Avezova Nilufar Rabbanqulovna¹- t.f.d., prof.,

<https://orcid.org/0000-0002-4298-1041> e-mail: avezovanr@gmail.com

Raximov Ergashali Yuldashevich²- DSc, kat.i.x.,

<https://orcid.org/0000-0001-7128-4598> e-mail: eyurakhimov@gmail.com,

Dexkonova Maxlioxon Xusniddin qizi³-kichik ilmiy xodim,

<https://orcid.org/0000-0003-2556-4147> e-mail: dxmaxliyo@gmail.com

Rustamova Shahnoza Shuhrat qizi⁴ – tayanch doktorant,

<https://orcid.org/0009-0004-1401-3651> e-mail: shahnozarustamova1993@gmail.com

¹Farg'ona davlat texnika universiteti, Farg'ona shahar, Farg'ona ko'chasi, 86-uy, 150107, O'zbekiston

²Gidrometeorologiya ilmiy-tadqiqot instituti, Manzil: 1-Bodomzor yo'li ko'chasi, 72-uy, 100052, Toshkent, O'zbekiston

³Energetika vazirligi huzuridagi Qayta tiklanuvchi energiya manbalari milliy ilmiy-tadqiqot instituti, 100084, Toshkent sh., Chingiz Aytmatov ko'chasi, 2B-uy, 2-bino.

⁴I.Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent sh, Universitet ko'ch. 2.

Annotatsiya. Kirish. Maqolada O'zbekiston hududida fotoelektrik modullar frontal yuzasida muz hosil bo'lishining potensial xavfini baholashga doir yondashuv taklif etilgan. Baholash uchun kunduzgi manfiy haroratlarning davomiyligi, bunday kunlar soni va normallashtirilgan xavf indeksi asos qilib olingan. Natijalar tog'li, tog'oldi va ayrim shimoliy hududlarda xavf darajasi yuqoriroq ekanini ko'rsatadi.

Usul va materiallar. Tadqiqotda O'zbekiston hududi bo'yicha kunduzgi 0 °C va undan past haroratlarning davomiyligi hamda shunday kunlar sonini ifodalovchi kartografik materiallardan foydalanildi. Asosiy ko'rsatkichlar sifatida $H_{0,kun}$, $N_{0,kun}$ va I_{muz} indekslari joriy qilindi. Tahlilda modul yuzasi harorati, namlik, yog'in, shamol, radiatsiya va qiyalik burchagi kabi omillar muzlanishning real davomiyligini aniqlashtiruvchi omillar sifatida ko'rib chiqildi.

Natijalar. Tahlil natijasida kunduzgi manfiy haroratlarning hududiy tarqalishi bo'yicha O'zbekistonda potensial muzlanish xavfi notekis ekanini aniqlandi. Eng yuqori xavf tog'li va tog'oldi hududlarida, shuningdek ayrim shimoliy zonalarda kuzatiladi; markaziy va janubiy tekisliklarda esa xavf nisbatan past. Taklif etilgan indeks asosida hududlarni past, o'rta, yuqori va juda yuqori xavf toifalariga ajratish imkoniyati ko'rsatildi.

Xulosa. Kunduzgi manfiy haroratlarning davomiyligi fotoelektrik modullar frontal yuzasida muz hosil bo'lish xavfini dastlabki baholash uchun qulay iqlimiy-termik ko'rsatkich hisoblanadi. Taklif etilgan yondashuv joy tanlash, qiyalik burchagini asoslash, qishki monitoring va ekspluatatsion reglamentlarni ishlab chiqishda amaliy ahamiyatga ega. Biroq real muzlanish va energiya yo'qotishlarini aniq baholash uchun dala kuzatuvlari asosida qo'shimcha verifikatsiya zarur.

Kalit so'zlar: fotoelektrik modul, frontal yuza, muzlanish, qirov, qor qoplami, kunduzgi manfiy harorat, O'zbekiston, qishki ekspluatatsiya, xavf indeksi.

Дата поступления: 12.05.2026. После обработки: 15.05.2025 Принято печать: 22.06.2026

For citation: Avezova N.R., Rakhimov E.Yu., Dexkonova M.Kh., Rustamova Sh.Sh. Assessment of the potential icing risk on the front surface of photovoltaic modules in Uzbekistan based on the duration of daytime subzero temperatures. Alternative energy. 2026. 2 (23). pp. 9-18.



УДК 620.92; 620.98

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОГО РИСКА ОБЛЕДЕНЕНИЯ ФРОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ НА ТЕРРИТОРИИ УЗБЕКИСТАНА НА ОСНОВЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ДНЕВНЫХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР

Авезова Нилуфар Раббанакуловна¹ - д.т.н, проф.,
<https://orcid.org/0000-0002-4298-1041> e-mail: avezovanr@gmail.com

Рахимов Эргашали Юлдашевич² - DSc, с.н.с.,
<https://orcid.org/0000-0001-7128-4598> e-mail: eyurakhimov@gmail.com,

Дехконова Махлиёхон Хусниддин кизи³ – PhD, с.н.с.
<https://orcid.org/0000-0003-2556-4147> e-mail: dxmaxliyo@gmail.com

Рустамова Шахноза Шухрат кизи⁴ - базовый докторант.
<https://orcid.org/0009-0004-1401-3651> e-mail: shahnozarustamova1993@gmail.com

¹Ферганской государственной технической университет, 150107, Республика Узбекистан, г. Фергана, ул. Фергана, дом 86.,

²Научно-исследовательский институт гидрометеорологии (НИИГМ), ул.1-й Бодомзор йули, дом 72, 100052, Ташкент, Узбекистан

³Национального научно-исследовательского института возобновляемых источников энергии при Министерстве энергетики. 100084, г. Ташкент, ул. Чингиза Айтматова, дом 2В, здание 2,

⁴Ташкентский государственный технический университет имени И. Каримова, г. Ташкент, ул. Университетская, 2.

Аннотация. Введение. В статье предложен подход к оценке потенциального риска образования льда на фронтальной поверхности фотоэлектрических модулей на территории Узбекистана. В основу оценки положены продолжительность дневных отрицательных температур, число таких дней и нормированный индекс риска. Показано, что наиболее высокий риск характерен для горных, предгорных и отдельных северных районов страны.

Методы и материалы. В работе использованы картографические материалы по территории Узбекистана, отражающие суммарную продолжительность дневных часов с температурой 0 °C и ниже, а также число дней с такими условиями. Введены показатели $N_{0, \text{день}}$, $N_{0, \text{ночь}}$ и индекс $I_{\text{лед}}$. Дополнительно рассмотрены факторы, уточняющие фактическое состояние поверхности модуля: температура поверхности, влажность, твёрдые осадки, скорость ветра, радиация в плоскости модуля и угол наклона.

Результаты. Анализ показал выраженную территориальную неоднородность потенциального риска. Максимальные значения характерны для горных и предгорных зон, а также для части северных регионов, тогда как в центральных и южных равнинных районах риск ниже и чаще связан с кратковременным утренним инеем. На основе индекса $I_{\text{лед}}$ предложена предварительная классификация территорий по уровням риска.

Заключение. Продолжительность дневных отрицательных температур может использоваться как скрининговый климато-термический индикатор потенциального риска обледенения фронтальной поверхности ФЭМ. Предложенный подход полезен при выборе площадок, определении угла наклона модулей, планировании зимнего мониторинга и разработке регламентов эксплуатации. Для количественной оценки фактического обледенения и потерь генерации требуется дальнейшая верификация по данным натурных наблюдений.



Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, фронтальная поверхность, обледенение, иней, снежный покров, дневная отрицательная температура, Узбекистан, зимняя эксплуатация, индекс риска.

UDC 620.92; 620.98

ASSESSMENT OF THE POTENTIAL ICING RISK ON THE FRONT SURFACE OF PHOTOVOLTAIC MODULES IN UZBEKISTAN BASED ON THE DURATION OF DAYTIME SUBZERO TEMPERATURES

Avezova Nilufar Rabbanakulovna¹-DSc, prof

<https://orcid.org/0000-0002-4298-1041> e-mail: avezovanr@gmail.com

Rakhimov Ergashali Yuldashevich²- DSc, kat.i.x.,

<https://orcid.org/0000-0001-7128-4598> e-mail: eyurakhimov@gmail.com,

Dekhkonova Makhliyokhon Khusnidin kizi³ – PhD, Senior researcher,

<https://orcid.org/0000-0002-7723-0045> e-mail: dxmaxliyo@gmail.com

Rustamova Shahnoza Shuhrat kizi⁴- PhD student

<https://orcid.org/0009-0004-1401-3651> e-mail: shahnozarustamova1993@gmail.com

¹Fergana State Technical University, 150107, Uzbekistan, Ferg. city, Fergana Street, House 86.

²Hydrometeorological Research Institute (HMRSI), Address: 72, 1-Bodomzor Yuli Street, 100052, Tashkent, Uzbekistan.

³National Scientific Research Institute of Renewable Energy Sources under the Ministry of Energy, 100084, Tashkent, Chingiz Aitmatov Street, House 2B, Building 2.

⁴Islam Karimov Tashkent State Technical University, 2 Universitet Street, Tashkent, Uzbekistan.

Abstract. Introduction. The paper proposes an approach to assessing the potential icing risk on the front surface of photovoltaic modules across Uzbekistan. The assessment is based on the duration of daytime subzero temperatures, the number of such days, and a normalized risk index. The results show that the highest potential risk is characteristic of mountainous, foothill, and some northern regions of the country.

Methods and materials. The study uses cartographic materials for Uzbekistan showing the total duration of daytime hours with air temperatures of 0 °C and below, as well as the number of days with such conditions. The indicators $H_{0,day}$, $N_{0,day}$, and the index I_{ice} were introduced. Additional factors affecting the actual surface condition of the module, including surface temperature, humidity, solid precipitation, wind speed, irradiance in the module plane, and tilt angle, were also considered.

Results. The analysis revealed a pronounced spatial heterogeneity of the potential icing risk across Uzbekistan. The highest values are typical of mountainous and foothill areas, as well as parts of the northern regions, whereas the risk is lower in central and southern plains and is more often associated with short-term morning frost. Based on the I_{ice} index, a preliminary territorial classification of icing risk levels was proposed.

Conclusion. The duration of daytime subzero temperatures can be used as a screening climatic and thermal indicator of the potential icing risk on the front surface of photovoltaic modules. The proposed approach is useful for site selection, justification of module tilt angle, winter monitoring, and the development of local operating regulations. However, quantitative assessment of actual icing and energy losses requires further validation using field observations.

Keywords: photovoltaic module, front surface, icing, frost, snow cover, daytime subzero temperature, Uzbekistan, winter operation, risk index.



Введение.

Годовая выработка фотоэлектрических систем определяется не только солнечной радиацией, КПД модулей и инверторов, схемой электрического соединения и качеством мониторинга, но и состоянием фронтальной поверхности модулей. Пыль, иней, лед, снежный слой и другие отложения уменьшают поток полезного излучения, достигающего фотоэлектрических элементов, а при неравномерном покрытии могут вызывать токовый дисбаланс между ячейками и подцепочками. Поэтому состояние стеклянной поверхности ФЭМ является самостоятельным эксплуатационным фактором, который необходимо учитывать при оценке надежности и энергетической эффективности солнечных электростанций.

Для Узбекистана солнечная энергетика традиционно рассматривается через призму высокой инсоляции, сухого климата, запыленности и высоких летних температур. Однако территория страны климатически неоднородна: северные равнинные зоны, Устюрт и Приаралье, пустынные и полупустынные районы, Ферганская долина, горные и предгорные области отличаются по зимней температуре, влажности, ветровому режиму и вероятности твердых осадков. В связи с этим при проектировании и эксплуатации ФЭМ важно учитывать не только годовые значения ГСР (горизонтальной суммарной радиации) и ПСР (прямой солнечной радиации), но и продолжительность дневных периодов с температурой воздуха 0°C и ниже.

Обледенение фронтальной поверхности ФЭМ не возникает автоматически при каждом эпизоде отрицательной температуры воздуха. Днем поверхность модуля может нагреваться солнечной радиацией и иметь температуру выше температуры окружающего воздуха. Напротив, при высокой влажности, тумане, снегопаде, слабом ветре и низкой радиации иней или лед могут сохраняться дольше. Поэтому в данной работе отрицательная температура воздуха используется как базовый индикатор потенциального термического риска, а не как прямой эквивалент фактического времени обледенения.

Такое методическое разграничение принципиально важно: карты дневных отрицательных температур показывают климатико-термический фон, благоприятный для образования или сохранения инея, льда и снежного слоя, но не заменяют натурного мониторинга состояния поверхности модуля. Следовательно, предлагаемый подход следует рассматривать как первый уровень регионального скрининга зимнего эксплуатационного риска ФЭМ.

В этом свете целью настоящего исследования является оценка потенциального риска обледенения фронтальной поверхности ФЭМ на территории Узбекистана на основе продолжительности астрономического дневного периода, в течение которого температура воздуха составляет 0°C и ниже, и связать этот риск с задачами зимней эксплуатации фотоэлектрических систем.

Для достижения поставленной цели в настоящем сообщении рассматривались следующие задачи: продолжительность дневных периодов с температурой воздуха 0°C и ниже в разрезе часов и дней за год; показатели $N_{0,\text{день}}$ и $N_{0,\text{день}}$ как индикаторы потенциального термического риска для фронтальной поверхности ФЭМ; нормированный индекс $I_{\text{лед}}$ для сопоставления территорий по уровню потенциального риска обледенения; границы потенциального риска обледенения и фактическое состояние поверхности модуля; факторы, которые переводят термический потенциал в реальное обледенение такие как влажность, твердые осадки, ветер, радиация в плоскости модуля, угол наклона и температура фронтальной поверхности; зоны низкого, среднего, высокого и очень высокого риска и на их основе сформулировать рекомендации для зимнего мониторинга и обслуживания ФЭМ.

Научная значимость исследования состоит в формализации климатико-термического подхода к оценке потенциального риска обледенения фронтальной поверхности ФЭМ в условиях Узбекистана. Предложенные авторами показатели $N_{0,\text{день}}$, $N_{0,\text{день}}$ и $I_{\text{лед}}$ образуют основу для дальнейшей разработки региональных моделей зимнего эксплуатационного риска.



Практическая значимость заключается в возможности использования индекса $I_{\text{лед}}$ при выборе площадок, уточнении угла наклона модулей, планировании зимнего ТОиР-регламента, объяснении сезонных провалов генерации и разработке системы мониторинга состояния фронтальной поверхности ФЭМ.

Основная часть. Международные исследования показывают, что снег, лед и другие виды поверхностного покрытия ФЭМ могут вызывать заметные энергетические потери. В работах по моделированию снежных потерь подчеркивается, что величина потерь зависит от толщины и площади покрытия, угла наклона модулей, температуры, солнечной радиации, процесса скольжения снега и особенностей конструкции [4, 5, 8, 9].

В отчетах IEA PVPS Task 13 загрязнение, снег и климатически обусловленные эксплуатационные факторы рассматриваются как значимые причины снижения энергетической отдачи фотоэлектрических станций. Для разных климатических зон предлагается адаптировать программы эксплуатации и технического обслуживания (ТОиР), включая мониторинг состояния модулей, планирование профилактики и учет локальных климатических рисков [1, 3, 6, 7].

Модели температуры ФЭМ, в том числе Sandia Module Temperature Model, показывают, что температура модуля определяется не только температурой воздуха, но также радиацией в плоскости массива и скоростью ветра [2, 10, 11]. Это особенно важно для зимнего периода: даже при отрицательной температуре воздуха модуль может нагреваться до положительных температур, если солнечная радиация достаточна. Поэтому оценка риска обледенения только по температуре воздуха требует аккуратной интерпретации.

Для Узбекистана задача имеет особую прикладную значимость. Большая часть исследований и проектных оценок ориентирована на высокий солнечный ресурс, высокую температуру и запыленность, тогда как зимние явления - иней, лед, снег и кратковременное затенение фронтальной поверхности - изучены значительно слабее. В этой связи региональная оценка дневных отрицательных температур может служить удобным первым этапом для выявления территорий, где зимний мониторинг ФЭМ должен быть более детальным.

Материалы и методика. Исходные данные и базовые допущения.

В качестве исходного материала использованы две карты для территории Узбекистана:

1. Карта суммарной продолжительности дневных часов, в которые температура воздуха составляет 0°C и ниже;

2. Карта числа дней, в которые в дневной период наблюдается температура воздуха 0°C и ниже. Карты приведены на Рис. 1 и 2 и обозначены в исходном материале как [12].

Под дневным периодом в данной работе понимается астрономический интервал от восхода до захода Солнца. Следовательно, термин «дневные часы» не означает только фактические часы солнечного сияния при ясном небе. Облачность, туман и реальная продолжительность солнечного сияния в данном картографическом слое отдельно не фильтруются. Такой подход позволяет оценить холодный дневной термический фон, важный для зимней эксплуатации ФЭМ, но не позволяет напрямую вычислить фактическую длительность наличия льда или снега на модуле.

Показатели дневной отрицательной температуры. Суммарная продолжительность дневных отрицательных температур определяется как:

$$N_{0,\text{день}} = \sum I[T_a(t) \leq 0] \cdot \Delta t \quad \text{ч/год}, \quad (1)$$

где $N_{0,\text{день}}$ - суммарное число астрономических дневных часов с температурой воздуха 0°C и ниже, $T_a(t)$ - температура окружающего воздуха в момент времени t , I - индикаторная функция, принимающая значение 1 при выполнении условия и 0 в противном случае, Δt - временной шаг расчета. При использовании часовых данных $\Delta t = 1$ ч.

Число дней с дневной отрицательной температурой определяется следующим образом:



$$N_{0, \text{день}} = \sum_d I [\exists t \in D_d : T_a(t) \leq 0^\circ\text{C}], \text{ дни/год}, \quad (2)$$

где $N_{0, \text{день}}$ - число дней в году, в течение которых хотя бы один час астрономического дневного периода имеет температуру воздуха 0°C и ниже; $D_{\text{день}}$ - множество дневных временных шагов в пределах d -го календарного дня. Такое определение устраняет неоднозначность между “среднесуточной отрицательной температурой” и “наличием хотя бы одного холодного дневного часа”.

Потенциальная и фактическая длительность обледенения. В первом приближении потенциальная дневная длительность условий, благоприятных для обледенения ФЭМ, может быть выражена через показатель $N_{0, \text{день}}$:

$$\tau_{\text{лед, пот}} = H_{0, \text{день}} \quad (3)$$

Однако фактическое обледенение фронтальной поверхности ФЭМ определяется не только температурой воздуха. Для перехода от термического потенциала к реальной длительности обледенения необходим корректирующий коэффициент:

$$t_{\text{лед, факт}} = H_{0, \text{день}} \cdot K_m. \quad (4)$$

Коэффициент K_m является безразмерным методическим множителем, который в данной работе не рассчитывается количественно и должен быть калиброван по данным полевых наблюдений. Он может учитывать, как уменьшение риска за счет солнечного прогрева и ветра, так и увеличение эффективной длительности покрытия при наличии снега, высокой влажности, тумана или слабого скольжения снежного слоя.

$$K_m = f(RH, P_{\text{снег}}, V, G_{\text{накл}}, \beta, T_{\text{фронт}}), \quad (5)$$

где RH - относительная влажность воздуха; $P_{\text{снег}}$ - вероятность или факт наличия снега и твердых осадков; V - скорость ветра; $G_{\text{накл}}$ - суммарная наклонная солнечная радиация в плоскости фотоэлектрического модуля; β - угол наклона модуля; $T_{\text{фронт}}$ - температура фронтальной поверхности ФЭМ.

Учет температуры поверхности ФЭМ. Температура фронтальной поверхности и температура воздуха могут существенно различаться. Для оценки температуры модуля может быть использована модель Sandia, в которой температура модуля выражается через температуру воздуха, радиацию в плоскости модуля и скорость ветра [2, 10, 11]:

$$T_m = T_a + E_{\text{накл}} \cdot \exp(a + b \cdot V), \quad (6)$$

где T_m - температура модуля; T_a - температура воздуха; $E_{\text{накл}}$ - эффективная наклонная солнечная радиация, падающая на плоскость модуля; V - скорость ветра; a и b - эмпирические коэффициенты, зависящие от конструкции модуля и типа монтажа. Формула показывает, что отрицательная температура воздуха не является достаточным условием фактического обледенения ФЭМ: при достаточной радиации поверхность модуля может прогреваться выше 0°C .

Нормированный индекс потенциального риска обледенения. Для территориального сопоставления предлагается нормированный индекс потенциального риска обледенения фронтальной поверхности ФЭМ:

$$I_{\text{лед}} = 0.7 \cdot \left(\frac{N_{0, \text{день}}}{N_{\text{макс}}} \right) + 0.3 \cdot \left(\frac{H_{0, \text{день}}}{H_{\text{макс}}} \right) \quad (7)$$

Здесь $N_{\text{макс}}$ и $H_{\text{макс}}$ - максимальные значения соответствующих показателей на рассматриваемых картах. В данной работе приняты $N_{\text{макс}} = 1460$ ч/год и $N_{\text{макс}} = 145$ дней/год. Вес 0,7 для $N_{0, \text{день}}$ отражает то, что энергетический эффект обледенения в первую очередь связан с длительностью покрытия во времени. Вес 0,3 для $N_{0, \text{день}}$ учитывает эксплуатационную частоту событий, важную для планирования визуального контроля, очистки и анализа потерь генерации. Указанные веса следует рассматривать как предварительные экспертные коэффициенты, которые в дальнейшем могут быть уточнены по данным фактических энергетических потерь и наблюдений за поверхностью ФЭМ.

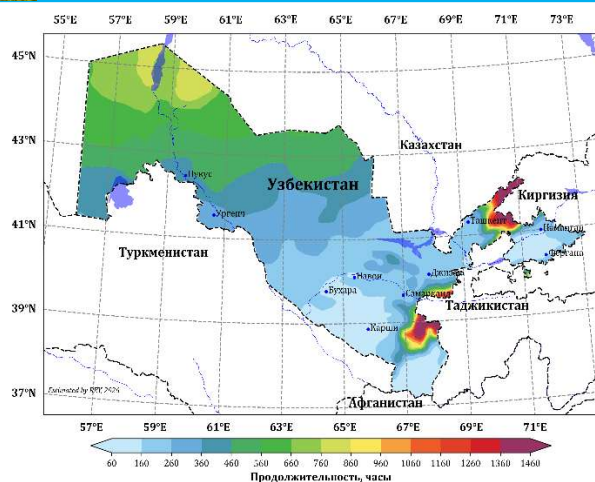


Рис. 1. Продолжительность астрономического дневного периода с темп. воздуха 0°C и ниже на территории Узбекистана, ч/год (по картографическим материалам [12]).

Fig. 1. Duration of the astronomical daytime period with air temperature of 0°C and below across the territory of Uzbekistan, h/year (based on cartographic materials [12]).

Результаты и обсуждение. Общая пространственная картина риска. Анализ карт показывает выраженную территориальную неоднородность дневных отрицательных температур. Максимальные значения $N_{0, \text{день}}$ и $N_{0, \text{ночь}}$ сосредоточены в горных и предгорных районах, особенно в восточной и юго-восточной частях страны, а также в отдельных участках Ташкентской, Самаркандской и Кашкадарьинской областей. В этих зонах продолжительность дневных холодных периодов может достигать 960-1460 ч/год, а число дней -95-145 дней/год.

Северные и северо-западные районы, включая часть Каракалпакстана, характеризуются продолжительным холодным сезоном. Здесь риск обусловлен прежде всего низкой температурой воздуха, ветром и утренним инеем. При этом сравнительно сухой климат может снижать вероятность длительного сохранения ледяного слоя по сравнению с более влажными горными районами.

В центральных и южных равнинных районах - в частности, в Навоийской, Бухарской и равнинной части Кашкадарьинской области - дневная отрицательная температура встречается реже. Здесь потенциальный риск длительного обледенения ниже, но кратковременный утренний иней или локальные эпизоды замерзания после осадков полностью исключать нельзя.

Ферганская долина имеет дифференцированный характер риска: в низинной части риск ниже, тогда как в предгорьях он возрастает из-за более частых отрицательных температур, повышенной влажности, туманов и влияния местного рельефа.

Горные и предгорные территории. Наиболее высокий потенциальный риск обледенения формируется в горных и предгорных зонах. Здесь сочетание низких температур, возможных твердых осадков, повышенной влажности и более длительного сохранения снежного покрова создает условия для образования инея, льда и частичного или полного покрытия фронтальной поверхности ФЭМ. Для таких территорий особенно важны повышенный угол наклона модулей, достаточный просвет для схода снега, визуальный или камерный мониторинг и регламент осмотра после снегопадов.

Северные и северо-западные территории. В северных и северо-западных районах показатель $N_{0, \text{день}}$ может достигать **средневысоких** значений, что указывает на частую повторяемость холодных дневных эпизодов. Однако более сухой воздух может ограничивать

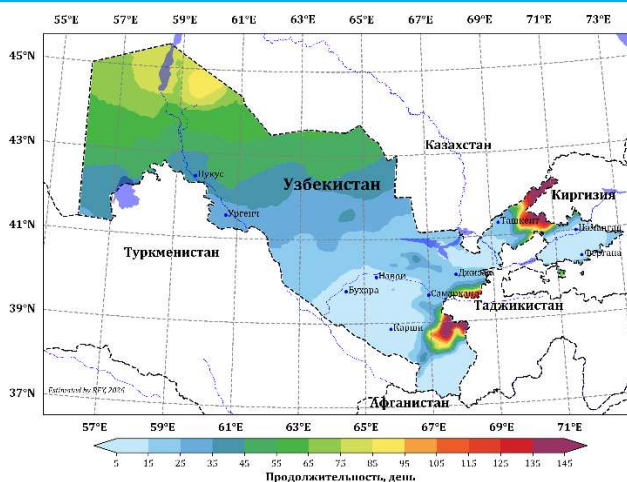


Рис. 2. Число дней, в которые в астрономический дневной период наблюдается температура воздуха 0°C и ниже, дни/год (по картографическим материалам [12]).

Fig. 2. Number of days during which air temperature of 0°C and below is observed within the astronomical daytime period, days/year (based on cartographic materials [12]).



длительное сохранение льда. В этих условиях основными механизмами риска являются утреннее обмерзание, иней, ветровое охлаждение и снижение генерации в первые часы работы станции.

Центральные и южные равнинные территории. Для центральных и южных равнинных территорий характерны сравнительно низкие значения $N_{0, \text{день}}$ и $N_{0, \text{день}}$. Поэтому обледенение ФЭМ здесь, как правило, должно рассматриваться как кратковременный эксплуатационный фактор. Основными мерами являются стандартный мониторинг генерации, проверка фронтальной поверхности после редких холодных осадков и анализ резких утренних провалов мощности.

Классификация территорий по индексу $I_{\text{лед}}$. На основе индекса $I_{\text{лед}}$ предлагается предварительная классификация территорий по уровню потенциального риска обледенения. Границы классов являются ориентировочными и могут уточняться после накопления данных натурного мониторинга.

Таблица 1.

Предварительная классификация потенциального риска обледенения фронтальной поверхности ФЭМ по индексу $I_{\text{лед}}$.

Класс риска	Диапазон $I_{\text{лед}}$	Характерные территории	Рекомендации для эксплуатации ФЭМ
Низкий	$I_{\text{лед}} < 0,25$	Центральные и южные равнинные районы; зоны с малым числом дневных холодных часов.	Стандартный угол наклона; обычный визуальный контроль; анализ кратковременных утренних провалов генерации.
Средний	$0,25 \leq I_{\text{лед}} < 0,50$	Северные равнинные районы; отдельные участки долин и предгорий.	Усиленный зимний мониторинг; адаптация угла наклона к местному климату; профилактический осмотр после холодных осадков.
Высокий	$0,50 \leq I_{\text{лед}} < 0,75$	Отдельные северные зоны Каракалпакстана; предгорные территории.	Повышенный угол наклона; учет схода снега между рядами; камерный или регулярный визуальный контроль.
Очень высокий	$I_{\text{лед}} \geq 0,75$	Горные части Ташкентской, Самаркандской, Кашкадарьинской и восточных областей.	Специальный зимний О&М-регламент; осмотр после снегопадов; очистка фронтальной поверхности; предпочтение конструкциям, благоприятным для схода снега.

Механизм влияния обледенения на выработку ФЭМ. Иней, лед или снежный слой на фронтальной поверхности ФЭМ снижают выработку несколькими путями. Во-первых, покрытие уменьшает поток излучения, доходящего до фотоэлектрических элементов. Во-вторых, при частичном или неравномерном покрытии возникает токовый дисбаланс, который может активировать байпасные диоды и снижать мощность всей цепочки. В-третьих, процесс таяния и схода снега зависит от угла наклона, состояния поверхности, температуры модуля, ветра и радиации, поэтому энергетические потери имеют выраженную временную динамику.

Потенциальные потери энергии от льда, инея или снежного покрытия можно представить в общем виде:

$$\Delta E_{\text{лед}} = \sum [G_{\text{накл}}(t) \cdot A \cdot \eta_m(e) \cdot C_{\text{лед}}(t) \cdot M(t) \cdot \Delta t] \quad (8)$$

где $\Delta E_{\text{лед}}$ - энергетические потери вследствие покрытия фронтальной поверхности; A - площадь модуля; $\eta_m(t)$ - эффективность модуля; $C_{\text{лед}}(t)$ - доля поверхности, покрытая инеем, льдом или снегом; $M(t)$ - коэффициент неравномерного покрытия и эффекта рассогласования; Δt - временной шаг. В данной работе $C_{\text{лед}}(t)$ непосредственно не измерялся,



поэтому $\Delta E_{\text{лед}}$ не оценивается количественно. Индекс $I_{\text{лед}}$ используется как предварительный региональный признак вероятности возникновения таких потерь.

Практические рекомендации:

– При выборе площадок для ФЭМ, особенно в горных, предгорных и северных районах, показатели $N_{0,\text{день}}$, $N_{0,\text{ночь}}$ и $I_{\text{лед}}$ целесообразно учитывать совместно с годовым солнечным ресурсом.

– Для зон среднего и высокого риска рекомендуется заранее предусматривать зимние проектные решения: увеличенный угол наклона модулей, достаточный межрядный просвет и конструкцию, не задерживающую сход снега.

– В зимний О&М-регламент следует включить контроль состояния фронтальной поверхности после снегопада, тумана и периодов высокой влажности, а также анализ резких снижений генерации относительно $G_{\text{накл}}$.

– Для верификации индекса $I_{\text{лед}}$ необходимо сопоставлять его с данными $T_{\text{фронт}}$, RH , осадков, ветра, $G_{\text{накл}}$, фото- или видеонаблюдении и фактической выработки ФЭМ.

Ограничения исследования и направления дальнейшей верификации

Научная новизна работы заключается в том, что для условий Узбекистана предложена региональная оценка потенциального риска обледенения фронтальной поверхности ФЭМ на основе продолжительности дневных отрицательных температур. Показатели $N_{0,\text{день}}$, $N_{0,\text{ночь}}$ и $I_{\text{лед}}$ рассматриваются как предварительные климатико-эксплуатационные критерии, пригодные для ранжирования территорий и последующей верификации по данным натурного мониторинга. При этом предложенный подход имеет скрининговый характер. Он позволяет выделить территории, где потенциальный термический риск обледенения выше, но не заменяет прямых наблюдений за состоянием поверхности модуля. Основные ограничения связаны с тем, что карты дневной отрицательной температуры не учитывают фактическую облачность, влажность, туман, снегопад, скорость ветра, радиацию в плоскости ФЭМ, угол наклона и температуру фронтальной поверхности.

Для перехода к количественной оценке фактических энергетических потерь необходимо организовать верификацию индекса $I_{\text{лед}}$. Оптимальный набор данных должен включать: температуру воздуха и поверхности модуля, относительную влажность, наличие твердых осадков, скорость ветра, $G_{\text{накл}}$, изображения поверхности модулей, данные инверторов и интервалы фактического снижения генерации. Такая база позволит статистически оценить коэффициент K_m и перейти от потенциального риска к прогнозу реального времени покрытия и энергетических потерь.

Выводы

1. Продолжительность астрономического дневного периода с температурой воздуха 0°C и ниже может использоваться как скрининговый климатико-термический индикатор потенциального риска обледенения фронтальной поверхности ФЭМ в условиях Узбекистана.

2. Наибольший риск по картографическому анализу характерен для горных и предгорных территорий, а также отдельных северных зон; в центральных и южных равнинных районах он ниже и чаще связан с кратковременным утренним инеем.

3. Показатели $N_{0,\text{день}}$, $N_{0,\text{ночь}}$ и нормированный индекс $I_{\text{лед}}$ позволяют предварительно классифицировать территории и использовать эту классификацию при выборе площадки, угла наклона, схемы мониторинга и зимнего О&М-регламента.

4. Предложенный подход оценивает не фактическую длительность наличия льда, а потенциал его возникновения; для количественной оценки реального обледенения и энергетических потерь необходима верификация по данным $T_{\text{фронт}}$, RH , осадков, ветра, $G_{\text{накл}}$, изображений поверхности и фактической генерации.

Список литературы

[1]. МЭК 61724-1:2021. Эксплуатационные характеристики фотоэлектрических систем. Часть 1: Мониторинг. – 2021.



- [2]. King D.L., Boyson W.E., Kratochvil J.A. Sandia photovoltaic array performance model. – Sandia National Laboratories, Report SAND2004-3535, 2004. – DOI: 10.2172/919131.
- [3]. IEA PVPS Task 13. Soiling losses: impact on photovoltaic power plant performance. – Report IEA-PVPS T13-21:2022. – 2022.
- [4]. Marion B., Schaefer R. et al. Measured and modeled photovoltaic system energy losses from snow cover // Solar Energy. – 2013. – Vol. 97. – Pp. 112–121. – DOI: 10.1016/j.solener.2013.07.029.
- [5]. Baldus-Jeursen C., Petsiuk A.L. et al. Snow losses in photovoltaic systems: validation of the Marion and Townsend models // IEEE Journal of Photovoltaics. – 2023. – Vol. 13, No. 4. – Pp. 610–620. – DOI: 10.1109/JPHOTOV.2023.3264644.
- [6]. Jahn U., Herteleer B. et al. Operation and maintenance guidelines for photovoltaic power plants under various climatic conditions. – IEA PVPS Task 13, Report T13-25:2022. – 2022.
- [7]. IEA PVPS Task 13. Photovoltaics and energy security in the Arctic region. – Report IEA-PVPS T13-40:2026. – 2026.
- [8]. Quan Z., Lu H. et al. Experimental measurement and numerical modeling of snow coverage processes on PV modules // Coatings. – 2023. – Vol. 13, No. 2. – Article 427. – DOI: 10.3390/coatings13020427.
- [9]. Ryberg D.S., Freeman J. et al. Integration, validation and application of a PV snow coverage model in SAM. – NREL Report NREL/TP-6A20-68705. – 2017.
- [10]. PV Performance Modeling Collaborative. Sandia module temperature model // Sandia National Laboratories / PVPMP [Electronic resource].
- [11]. Gilman P., Dobos A. et al. System Advisor Model (SAM) photovoltaic model technical update. – NREL Report NREL/TP-6A20-67399. – 2018.
- [12]. Regional Energy Yearbook (REY). Cartographic materials and climate data of daily temperatures. – 2026.