

Механизмы деградации, вызванные циклами заморзания–оттаивания в фотоэлектрических модулях в условиях холодного климата

Ю. Дэн,^{*} В. В. Давыдов[†]

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Институт машиностроения, материалов и транспорта
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
(Поступила в редакцию 29.05.2025; подписана в печать 21.09.2025)*

Современное развитие возобновляемой энергетики привело к широкому внедрению фотоэлектрических (ФЭ) систем. Несмотря на традиционные представления о использовании солнечных панелей, ряд разработок в области ФЭ позволяет получать неплохую выработку электрической энергии в регионах с холодным климатом. Однако эксплуатация ФЭ модулей в таких суровых условиях сталкивается с комплексом специфических воздействий, наиболее критичным из которых являются многократно повторяющиеся циклы заморзания и оттаивания влаги на солнечных панелях и их расширение и сжатие. Эти циклические температурные и механические нагрузки ускоряют деградацию материалов и компонентов, вызывая расслоение, коррозию и микротрещины, что критически влияет на производительность и долговечность систем. В работе представлено детальное исследование механизмов деградации ФЭ модулей, вызванных циклами заморзания–оттаивания, на примере климата Санкт-Петербурга. На основе натурных наблюдений и анализа данных, полученных другими учеными, выявлены и проанализированы ключевые деградационные процессы, влияющие на работоспособность ФЭ систем в данной климатической зоне. Полученные результаты необходимы для понимания специфики деградации в холодном климате для разработки методов повышения сохранения эксплуатационных характеристик ФЭ модулей, в первую очередь КПД преобразования солнечной энергии в электрическую.

PACS: 84.60.Jt

УДК: 53.044

Ключевые слова: фотоэлектрические модули, деградация, циклы заморзания–оттаивания, холодный климат, надежность, солнечная энергетика.

ВВЕДЕНИЕ

За последнее десятилетие ФЭ технологии совершили прорыв, утвердившись в качестве одного из наиболее перспективных и экологически чистых источников энергии [1]. Их стремительное развитие и снижение стоимости делают солнечную энергетику ключевым элементом глобальной энергетической трансформации. Изначально акцент в развитии солнечной энергетики делался на регионы с высоким уровнем инсоляции [2–4]. Однако исследования и практика показывают, что ФЭ системы могут быть экономически эффективными и надежными источниками энергии не только в умеренных и тропических поясах, но и в более суровых климатических условиях, включая субарктические регионы с продолжительными и холодными зимами [5, 6]. Несмотря на относительно низкую интенсивность солнечной радиации в зимние месяцы, суммарная выработка энергии в течение года может быть значительной, что обуславливает целесообразность внедрения ФЭ технологий в данных широтах [6–8].

Вместе с тем, эксплуатация ФЭ модулей в условиях холодного климата предъявляет особые требования к их конструкции, материалам и надежности. Низкие температуры, сильные ветры, снегопады, образование

льда и, что особенно важно, многократные переходы температуры через точку заморзания воды создают уникальные условия эксплуатации, ускоряющие процессы деградации. Согласно классификации климатов Кёппена, регионы, относящиеся к «холодным» и «полярным» типам, характеризуются регулярными снегопадами, и ФЭ установки в этих зонах подвержены существенному влиянию снежного покрова. Высокогорные районы также испытывают значительное воздействие льда и снега на работу ФЭ систем [9–14].

Ключевым фактором, определяющим специфику деградационных процессов в таких условиях, является явление циклов заморзания–оттаивания. Этот естественный процесс, при котором вода или влага, проникшая в структуру модуля, многократно претерпевает фазовые переходы между жидким и твердым состоянием, вызывает значительные механические напряжения и термические воздействия на материалы модуля из-за изменения объема воды при заморзании (примерно на 9%). Повторение этих циклов на протяжении всего срока службы ФЭ системы является одной из основных причин снижения её производительности и долговечности [6, 14].

В настоящей работе рассмотрены механизмы деградации ФЭ модулей, вызванные циклами заморзания–оттаивания, на примере эксплуатации фотоэлектрической системы в климатических условиях Санкт-Петербурга. Цель работы заключается в выявлении и анализе ключевых деградационных процессов, ассоциированных с воздействием снега, льда и перепадов

^{*} dyuanbiao@gmail.com

[†] davydov_vadim66@mail.ru

температур, а также в оценке их влияния на надежность ФЭ модулей. Полученные результаты позволят внести вклад в понимание проблем эксплуатации ФЭ систем в холодных регионах и могут быть использованы при разработке более устойчивых конструкций и материалов [12–14].

1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА СОСТОЯНИЕМ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

Исследование проводилось на действующей фотоэлектрической установке, расположенной на крыше здания в Санкт-Петербурге (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), где климат характеризуется частыми переходами температуры через 0°C в осенний и весенний периоды, что способствует активному проявлению циклов заморозания–оттаивания. Осень была выбрана для исследования, так как температура в этот период чаще приближается к 0°C , что способствует более активному проявлению процессов заморозания–оттаивания на поверхности ФЭ модулей. В то время как зимние температуры обычно значительно ниже 0°C , это создаёт экстремальные условия, которые менее подходят для наблюдения и анализа воздействия циклов заморозания–оттаивания на материалы ФЭ модулей. Необходимо отметить, что в феврале солнечная активность днем высокая и ФЭ модуль разогревается при температуре близкой к нулю. После захода Солнца температура быстро уменьшается и происходит высокий градиент изменения температуры в отрицательную область — резкое сжатие панели, особенно её токопроводящих контактов.

Объектом исследования являлись стандартные кремниевые ФЭ модули, установленные на наклонной конструкции, а методика включала комплекс натурных наблюдений в течение осеннего периода. Регулярно проводился визуальный осмотр поверхности ФЭ модулей и их периферийных элементов, таких как рама, стыки и распределительные коробки, с целью выявления видимых признаков воздействия окружающей среды, включая наличие снега, льда, инея, влаги, а также начальных стадий деградации, таких как трещины, расслоения и коррозия. Все наблюдаемые явления документировались с помощью фотокамеры, а предоставленные фотографии стали частью собранных данных.

Климатические особенности Санкт-Петербурга способствуют активному проявлению циклов заморозания–оттаивания в осенне-весенний период. Для характеристики условий региона на рис. 1 приведены среднемесячные значения температуры воздуха, продолжительности светового дня и средней продолжительности солнечного сияния по данным Гидрометцентра России. Видно, что температура в осенние месяцы часто колеблется вблизи 0°C , а короткий световой день и низкая продолжительность солнечного сияния усиливают воздействие неблагоприятных факторов на по-

верхность модулей. Эти климатические условия формируют предпосылки для активного проявления циклов заморозания–оттаивания, что делает Санкт-Петербург подходящим регионом для исследования данного эффекта.

Для оценки вырабатываемой мощности использовался стандартный подход, основанный на расчёте выходной энергии через солнечную радиацию, падающую на поверхность модуля. Теоретическая мощность определялась по формуле:

$$P = G \cdot S \cdot \eta,$$

где G — средняя солнечная радиация на горизонтальную поверхность ($\text{Вт}/\text{м}^2$), S — площадь фотоэлектрических панелей (м^2), η — коэффициент преобразования, равный 23.5%.

Такой метод позволяет сопоставить наблюдаемую выработку энергии с метеорологическими параметрами (средней температурой воздуха, числом солнечных часов и т.д.) и использовать его для анализа деградации характеристик модулей.

Следует отметить, что значение солнечной радиации G является времязависимой величиной, изменяющейся как в течение суток, так и в течение сезона. Для повышения точности расчётов рекомендуется производить вычисления с шагом по времени в пределах недели или трёх дней, а затем суммировать результаты. При уменьшении шага расчёта результаты становятся более детальными, однако они могут искажаться аномальными погодными условиями. Например, в жаркое лето значения выработки энергии могут превышать среднегодовые.

Кроме того, при прогнозировании выработки мощности во времени необходимо учитывать *коэффициент деградации* фотоэлектрических модулей, который зависит от условий эксплуатации и увеличивается с течением времени. Начальный коэффициент деградации для кремниевых ФЭ-модулей в идеальных лабораторных условиях составляет около 0.5% в год. В реальных условиях эксплуатации эта величина может быть выше.

В дальнейшем планируется разработка зависимости изменения коэффициента деградации от условий эксплуатации солнечных панелей. Такое исследование представляется актуальным для практических пользователей, особенно для малых солнечных электростанций (домашние хозяйства, удалённые территории, островные поселения, фермерские хозяйства и др.), где наличие оперативного обслуживания играет ключевую роль.

Наблюдения в ходе исследования были сосредоточены на выявлении процессов, связанных с накоплением и таянием снега, образованием инея на поверхности модулей, образованием льда на краях модулей и в области стыков, а также на последствиях воздействия влаги и льда на структуру модулей. Особое внимание уделялось моментам перехода температуры через 0°C .

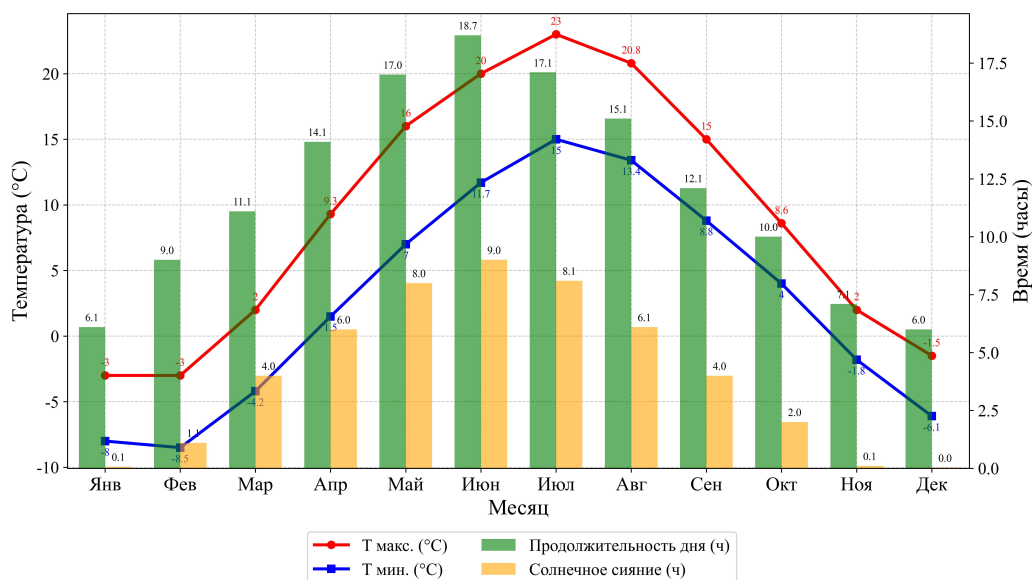


Рис. 1. Климат Санкт-Петербурга в среднемесечных значениях температуры, продолжительности дня и солнечного сияния

Анализ данных проводился с использованием визуальных наблюдений и фотоматериалов, которые соотносились с записями о погодных условиях. Выявленные признаки деградации были проанализированы с точки зрения известных механизмов воздействия циклов заморозания–оттаивания на материалы ФЭ модулей.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В условиях снегового покрова на поверхности фотоэлектрических модулей при воздействии прямого солнечного излучения, особенно в период максимальной инсоляции (около полудня), происходит частичное преобразование падающего солнечного излучения в электрическую энергию, сопровождающееся выделением теплоты в самом модуле в результате омических потерь и абсорбции неиспользуемой части спектра. В процессе функционирования модуля под снегом формируется выраженный температурный градиент, где центральные области модуля, обладающие более высокой поглощательной способностью и генерирующие тепло, нагреваются сильнее периферийных участков, покрытых снегом или льдом. Этот локальный перегрев способствует интенсивному таянию снега в определенных зонах поверхности модуля, даже при отрицательных температурах окружающей среды. Процесс таяния снега при температурах, близких к нулю, проиллюстрирован на рис. 2.

По мере завершения светового дня и перехода фотоэлектрической системы в нерабочее состояние происходит снижение температуры модуля до равновесной с окружающей средой. Резкое падение температуры окружающей среды, характерное для суточных колебаний в холодном климате, провоцирует вторич-



Рис. 2. Таяние снега на поверхности фотоэлектрического модуля

ный фазовый переход растаявшей влаги. Жидкость, распределяясь под действием гравитации по наклонной поверхности защитного стекла и проникая в микрополости и стыки, впоследствии кристаллизуется, образуя нерегулярные ледяные структуры, особенно выраженные по краям модуля и в области его периметра, как показано на рис. 3.

Многokrатно повторяющиеся циклы заморозания–оттаивания, вызванные суточными или синоптическими колебаниями температуры вокруг точки кристаллизации воды, представляют собой серьезный вызов для обеспечения долгосрочной эксплуатационной надежности фотоэлектрических модулей. Повторяющиеся изменения объема инкапсулирующего материала (в част-



Рис. 3. Образование льда и инея на панелях при нулевой температуре: *а* — Иней на нижней части панели; *б* — образование льда на стыке при 0°C

Средняя выработка электрической энергии по месяцам (2021–2024 гг.)

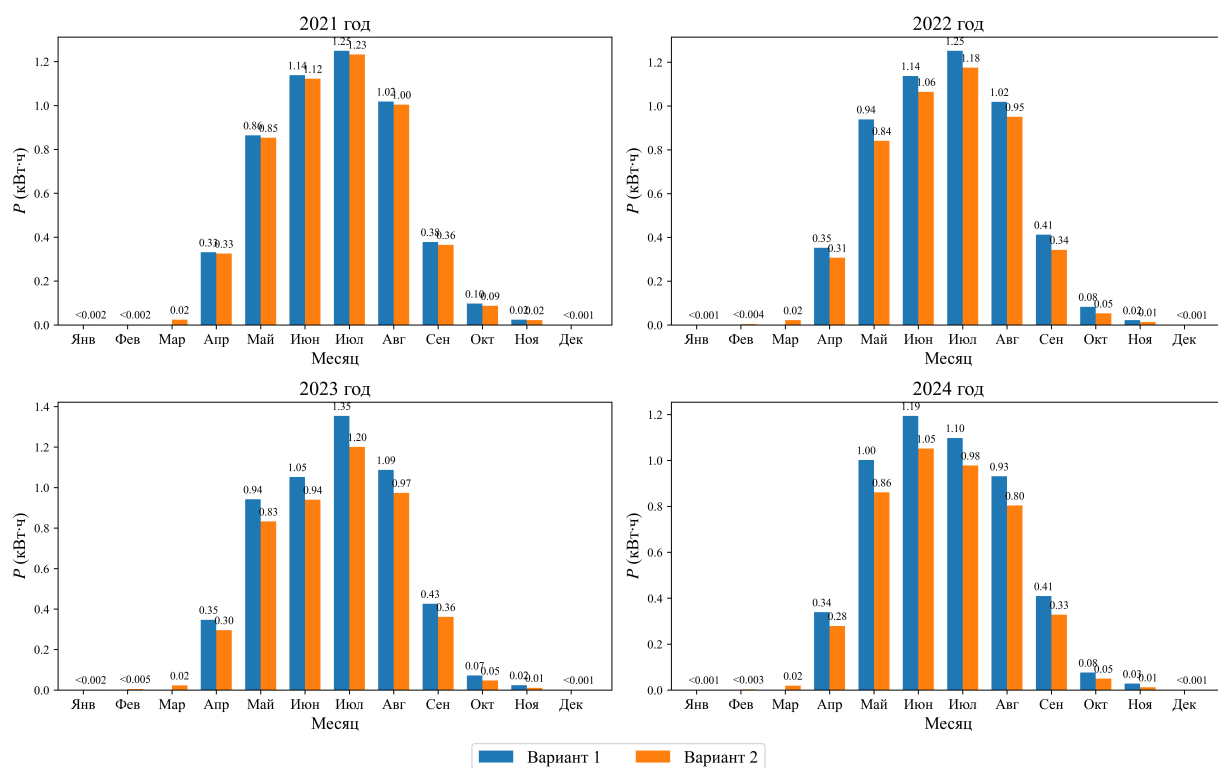


Рис. 4. Сравнение выработки электроэнергии фотоэлектрическими модулями по двум вариантам за 4 года

ности, этиленвинилацетата, EVA), вызванные абсорбцией влаги и ее фазовыми переходами между жидкой и твердой фазами, создают значительные внутренние напряжения. Эти напряжения интенсифицируют процессы расслоения (деламинации) между различными слоями модуля (стекло/инкапсулянт, инкапсу-

лянт/ячейка, инкапсулянт/тыльная пленка) и приводят к деградации оптических свойств инкапсулянта, снижая его светопропускание и, как следствие, эффективность модуля.

Кроме того, циклические механические нагрузки способны нарушать целостность герметизирующих ин-

терфейсов и уплотнений по периметру модуля, создавая капиллярные или макроскопические каналы для проникновения влаги из окружающей среды. Инфильтрация влаги внутрь модуля, в свою очередь, способствует развитию электрохимической коррозии металлических компонентов, включая элементы рамы, токопроводящие шины и межсоединения ячеек, что увеличивает последовательное сопротивление и снижает выходную мощность. Для полупроводниковых элементов на основе кремния низкотемпературные воздействия, в том числе напряжения, вызванные расширением замерзающей влаги, могут инициировать образование и развитие микротрещин. Наличие микротрещин ведет к снижению эффективной рабочей площади ячеек, увеличению локального сопротивления, появлению горячих точек и, как следствие, к необратимому ухудшению электрических характеристик и сокращению общего срока службы модуля.

Данные положения находят подтверждение в результатах исследований, проведенных в течение четырехлетнего периода с использованием двух идентичных комплексов кремниевых солнечных панелей. Первый комплекс на зимний период перемещался в помещение, исключающее воздействие влаги и отрицательных температур (далее — Вариант 1), тогда как второй комплекс эксплуатировался круглогодично (далее — Вариант 2). На рис. 4 обобщены результаты мониторинга выработки электрической энергии за период с 2021 по 2024 гг., представляя данные для каждого года в виде отдельных графиков.

Анализ полученных результатов полностью подтверждает ранее сделанные выводы о процессах деградации в кремниевых солнечных панелях. За четыре года наблюдений установлено, что разница в выработке электрической энергии между двумя вариантами эксплуатации солнечных панелей в летние месяцы превысила 12%.

Принятые критерии эффективности (неэффективная выработка < 0.4 кВт·ч/мес., пороговая — 0.4 кВт·ч/мес., эффективная > 0.4 кВт·ч/мес.) при анализе данных за 2021–2024 гг. выявили следующую. Для обоих вариантов эксплуатации (Вариант 1 — панели, убираемые на зиму; Вариант 2 — панели, эксплуатируемые круглогодично) зимние месяцы (декабрь–февраль), а также март, октябрь и ноябрь стабильно демонстрировали неэффективную выработку. Для Варианта 1 выработка в эти месяцы была нулевой (в со-

ответствии с отсутствием эксплуатации), а для Варианта 2 — крайне низкой. Апрельские показатели также ежегодно оставались ниже порога 0.4 кВт·ч для обоих вариантов.

При экстраполяции этой разницы на солнечную станцию из 100 таких модулей — потери за счет деградации составляют в июне месяце более 14.2 кВт·ч. Ситуация выглядит мало перспективной для дальнейшего процесса выработки электрической энергии в 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее исследование подтверждает, что циклы заморозания–оттаивания играют существенную роль в деградации фотоэлектрических модулей, эксплуатируемых в условиях холодного климата Санкт-Петербурга. Натурные наблюдения выявили активные процессы таяния снега на поверхности модулей с последующим образованием льда и инея в ночное время и при понижении температуры. Эти процессы приводят к возникновению механических и термических напряжений в материалах модулей, что, вероятно, способствует расслоению, образованию микротрещин, особенно внутренних, в кремниевых ячейках, нарушению герметичности и коррозии металлических компонентов.

Для поддержания эффективности и продления срока службы ФЭ модулей в регионах с холодным климатом, подверженных циклам заморозания–оттаивания, крайне важно учитывать эти механизмы деградации при проектировании систем, выборе материалов и разработке стратегий эксплуатации и обслуживания. Такие меры, как применение устойчивых к обледенению покрытий и своевременное удаление снега и льда, могут существенно смягчить негативные последствия.

Направления дальнейших исследований будет связано с более глубоким пониманием процессов деградации и разработки эффективных методов противодействия негативным факторам, связанных с климатическими условиями. А также по разработке математической модели для моделирования циклов заморозания–оттаивания с последующим анализом изменений в структуре и свойствах материалов модулей.

Работа выполнена при частичной поддержке стипендиальной программы CSC (China Scholarship Council) (проект № 202409010253).

-
- [1] *Fjeldheim H., Kristjansdottir T., Sørnes K.* // *Passivhus Norden. Sustainable Cities and Buildings*. 2015.
 - [2] *Andenaes E., Jelle B.P., Ramlo K.* et al. // *Solar Energy*. **159**. 318 (2018).
 - [3] *Костик Н.Р., Сипатдинов А.М., Бобыль А.В., Эрк А.Ф.* // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. **68**, № 3 (44). 86 (2021).
 - [4] *Костик Н.Р., Бобыль А.В.* // *АгроЭкоИнженерия*. № 2

(107). 25 (2021).

- [5] *Baldus-Jeursen C., Cote A., Deer T., Poissant Y.* // *Renewable Energy*. **174**. 547 (2021).
- [6] *Deng Y., Davydov V.* // In *Proceeding of the 2023 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*. St. Petersburg, 348 (2023).
- [7] *Shekar V., Calo A., Pongracz E.* // *Renewable Energy*. **217**. 119162 (2023).

- [8] Deng Y., Davydov V.V. // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. **17**, № S3.2. 256 (2024).
- [9] Andrews R. W., Pollard A., Pearce J. M. // Solar Energy. **92**. 84 (2013).
- [10] Kako T., Nakajima A., Irie H. и др. // Journal of Materials Science. **39**. 547 (2004).
- [11] Parida B., Iniyar S., Goic R. // Renewable and sustainable energy reviews. **15**, N 3. 1625 (2011).
- [12] Boudjemila L., Davydov V., Klinkov V. // In Proceeding of the 2023 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEExPolytech). St. Petersburg, 410 (2023).
- [13] Kostik N., Chatterjee S., Bobyl A., Davydov R. // In Proceedings of the 2021 International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EEExPolytech 2021. 273 (2021).
- [14] Шнейзман В.В., Николаев В.И., Поздняков А.О. и др. // Журнал технической физики. **90**, № 7. 1168 (2020).

Freeze-Thaw Cycle-Induced Degradation Mechanisms in Photovoltaic Modules in Cold Climates

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Metallurgy, Materials and Transport
St. Petersburg, 195251, Russia

E-mail: ^aadyuanbiao@gmail.com, ^bdavydov_vadim66@mail.ru

The modern development of renewable energy has led to the widespread adoption of photovoltaic (PV) systems. Despite traditional views, PV technologies show significant potential in cold climate regions, including vast areas of Russia, where the annual energy yield can be economically viable. However, the operation of PV modules in such harsh conditions faces a complex set of specific impacts, the most critical of which are the repeatedly occurring freeze-thaw cycles of moisture. These cyclic thermal and mechanical stresses accelerate the degradation of materials and components, causing delamination, corrosion, and microcracks, which critically affect the performance and longevity of the systems. This article is dedicated to a detailed study of the degradation mechanisms of PV modules caused by freeze-thaw cycles, using the climate of St. Petersburg as an example. Based on field observations and literature analysis, the key degradation processes affecting the reliability of PV systems in this climate zone have been identified and analyzed. The goal of the work is to deepen the understanding of degradation specifics in cold climates to develop methods for enhancing the reliability of PV modules.

PACS: 84.60.Jt

Keywords: photovoltaic modules, degradation, freeze-thaw cycles, cold climate, reliability, solar energy.

Received 29 May 2025.

Сведения об авторах

1. Дэн Юаньбяо — аспирант 1-го курса; e-mail: dyuanbiao@gmail.com.
2. Давыдов Вадим Владимирович — доктор физ.-мат. наук, профессор; e-mail: davydov_vadim66@mail.ru.