

MUHANDISLIK

& IQTISODIYOT

№5

ijtimoiy-iqtisodiy, innovatsion texnik,
fan va ta'limga oid ilmiy-amaliy jurnal

2026
MAY



Milliy nashrlar

OAK: <https://oak.uz/pages/4802>

05.00.00 - Texnika fanlari

08.00.00 - Iqtisodiyot fanlar



Google Scholar

OPEN ACCESS

ULRICHSWEB™
GLOBAL SERIALS DIRECTORY

Academic Resource Index
ResearchBib

ISSN INTERNATIONAL STANDARD SERIAL NUMBER INTERNATIONAL CENTRE

CYBERLENINKA

OpenAIRE

ROAD

INDEX COPERNICUS INTERNATIONAL

BASE

Crossref

НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ БИБЛИОТЕКА LIBRARY.RU



ISSN: 3060-463X

РЭУ.РФ
РОССИЙСКИЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Г.В. ПЛЕХАНОВА
ТАШКЕНТСКИЙ ФИЛИАЛ



muhandislik **& iqtisodiyot**

ijtimoiy-iqtisodiy, innovatsion texnik,
fan va ta'limga oid ilmiy-amaliy jurnal

Elektron nashr, 2026-yil, may.

Bosh muharrir:

Zokirova Nodira Kalandarovna, iqtisodiyot fanlari doktori, DSc, professor

Bosh muharrir o'rinbosari:

Shakarov Zafar G'afarovich, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori, PhD, dotsent

Tahrir hay'ati:

Abduraxmanov Kalendar Xodjayevich, O'z FA akademigi, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Sharipov Kongratbay Avezimbetovich, texnika fanlari doktori, professor

Maxkamov Baxtiyor Shuxratovich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Abduraxmanova Gulnora Kalandarovna, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Shaumarov Said Sanatovich, texnika fanlari doktori, professor

Turayev Bahodir Xatamovich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Nasimov Dilmurod Abdulloyevich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Allayeva Gulchexra Jalgasovna, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Arabov Nurali Uralovich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Maxmudov Odiljon Xolmirzayevich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Xamrayeva Sayyora Nasimovna, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Bobonazarova Jamila Xolmurodovna, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Irmatova Aziza Baxromovna, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Bo'taboyev Mahammadjon To'ychiyevich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Shamshiyeva Nargizaxon Nosirxuja kizi, iqtisodiyot fanlari doktori, professor,

Xolmuxamedov Muhsinjon Murodullayevich, iqtisodiyot fanlari nomzodi, dotsent

Xodjayeva Nodiraxon Abdurashidovna, iqtisodiyot fanlari nomzodi, dotsent

Amanov Otabek Amankulovich, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), dotsent

Toxirov Jaloliddin Ochil o'g'li, texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Qurbonov Samandar Pulatovich, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Zikriyoyev Aziz Sadulloyevich, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Tabayev Azamat Zaripbayevich, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Sxay Lana Aleksandrovna, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), dotsent

Ismoilova Gulnora Fayzullayevna, iqtisodiyot fanlari nomzodi, dotsent

Djumaniyazov Umrbek Ilxamovich, iqtisodiyot fanlari nomzodi, dotsent

Kasimova Nargiza Sabitdjanovna, iqtisodiyot fanlari nomzodi, dotsent

Kalanova Moxigul Baxritdinovna, dotsent

Ashurzoda Luiza Muxtarovna, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Sharipov Sardor Begmaxmat o'g'li, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Tursunov Ulug'bek Sativoldiyevich, iqtisodiyot fanlari doktori (DSc), dotsent

Bauyetdinov Majit Janizaqovich, Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti dotsenti, PhD

Botirov Bozorbek Musurmon o'g'li, Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Sultonov Shavkatjon Abdullayevich, Kimyo fanlari doktori, (DSc)

Jo'raeva Malohat Muhammadovna, filologiya fanlari doktori (DSc), professor.

Yusupov Maxamadamin Abduxamidovich, iqtisodiyot fanlari nomzodi (DSc), professor

Kalonova Moxigul Baxritdinovna, iqtisodiyot fanlari nomzodi (PhD), dotsent

Mirzayev Kulmamat Djanzakovich, iqtisodiyot fanlari nomzodi (DSc), professor.

Karimova Nilufar Sadirdin qizi, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Norboyev Odil Abrayevich, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), dotsent

Nasimov Dilmurod Abdulloyevich, iqtisodiyot fanlari doktori (DSc), professor

Mirzayev Kulmamat Djanzakovich, iqtisodiyot fanlari doktori (DSc), professor

Karimova Nilufar Sadirdin qizi, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Pardaev Umidjon Uralovich, iqtisodiyot fanlari doktori (DSc), professor

Xolmirzayev Ulug'bek Abdulazizovich, Iqtisodiyot fanlari doktori (DSc)

muhandislik & iqtisodiyot

ijtimoiy-iqtisodiy, innovatsion texnik,
fan va ta'limga oid ilmiy-amaliy jurnal

- 05.01.00 – Axborot texnologiyalari, boshqaruv va kompyuter grafikasi
05.01.01 – Muhandislik geometriyasi va kompyuter grafikasi. Audio va video texnologiyalari
05.01.02 – Tizimli tahlil, boshqaruv va axborotni qayta ishlash
05.01.03 – Informatikaning nazariy asoslari
05.01.04 – Hisoblash mashinalari, majmualari va kompyuter tarmoqlarining matematik va dasturiy ta'minoti
05.01.05 – Axborotlarni himoyalash usullari va tizimlari. Axborot xavfsizligi
05.01.06 – Hisoblash texnikasi va boshqaruv tizimlarining elementlari va qurilmalari
05.01.07 – Matematik modellashtirish
05.01.11 – Raqamli texnologiyalar va sun'iy intellekt
05.02.00 – Mashinasozlik va mashinashunoslik
05.02.08 – Yer usti majmualari va uchish apparatlari
05.03.02 – Metrologiya va metrologiya ta'minoti
05.04.01 – Telekommunikatsiya va kompyuter tizimlari, telekommunikatsiya tarmoqlari va qurilmalari. Axborotlarni taqsimlash
05.05.03 – Yorug'lik texnikasi. Maxsus yoritish texnologiyasi
05.05.05 – Issiqlik texnikasining nazariy asoslari
05.05.06 – Qayta tiklanadigan energiya turlari asosidagi energiya qurilmalari
05.06.01 – To'qimachilik va yengil sanoat ishlab chiqarishlari materialshunosligi
05.08.03 – Temir yo'l transportini ishlatish
05.08.06 – "G'ildirakli va gusenisali mashinalar va ularni ishlatish" (texnika fanlari)
05.09.01 – Qurilish konstruksiyalari, bino va inshootlar
05.09.04 – Suv ta'minoti. Kanalizatsiya. Suv havzalarini muhofazalovchi qurilish tizimlari
10.00.06 – Qiyosiy adabiyotshunoslik, chog'ishtirma tilshunoslik va tarjimashunoslik
10.00.04 – Yevropa, Amerika va Avstraliya xalqlari tili va adabiyoti
08.00.01 – Iqtisodiyot nazariyasi
08.00.02 – Makroiqtisodiyot
08.00.03 – Sanoat iqtisodiyoti
08.00.04 – Qishloq xo'jaligi iqtisodiyoti
08.00.05 – Xizmat ko'rsatish tarmoqlari iqtisodiyoti
08.00.06 – Ekonometrika va statistika
08.00.07 – Moliya, pul muomalasi va kredit
08.00.08 – Buxgalteriya hisobi, iqtisodiy tahlil va audit
08.00.09 – Jahon iqtisodiyoti
08.00.10 – Demografiya. Mehnat iqtisodiyoti
08.00.11 – Marketing
08.00.12 – Mintaqaviy iqtisodiyot
08.00.13 – Menejment
08.00.14 – Iqtisodiyotda axborot tizimlari va texnologiyalari
08.00.15 – Tadbirkorlik va kichik biznes iqtisodiyoti
08.00.16 – Raqamli iqtisodiyot va xalqaro raqamli integratsiya
08.00.17 – Turizm va mehmonxona faoliyati

Ma'lumot uchun, OAK
Rayosatining 2024-yil 28-avgustdagi 360/5-son qarori bilan "Dissertatsiyalar asosiy ilmiy natijalarini chop etishga tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro'yxati"ga texnika va iqtisodiyot fanlari bo'yicha "Muhandislik va iqtisodiyot" jurnali ro'yxatga kiritilgan.

Muassis: "Tadbirkor va ishbilarmon" MChJ

Hamkorlarimiz:

1. Toshkent shahridagi G.V.Plexanov nomidagi Rossiya iqtisodiyot universiteti
2. Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti
3. Toshkent irrigatsiya va qishloq xo'jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti" milliy tadqiqot universiteti
4. Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti
5. Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti
6. Toshkent davlat transport universiteti
7. Toshkent arxitektura-qurilish universiteti
8. Toshkent kimyo-texnologiya universiteti
9. Jizzax politexnika instituti



MUNDARIJA

STERJEN KO'NDALANG KESIM YUZASI ELLIPS SHAKLIDAGI TRANSFORMATORNING QISQA TUTASHUV PAYTIDAGI MEKANIK ZO'RIQISHGA CHIDAMLILIGI	10
Bekishev Allabergen Yergashevich, Yakubova Dilfuza Kuanishovna, Saidova Nozima Akkulovna	
ВЛИЯНИЕ ДЕМОГРАФИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ НА РАЗВИТИЕ СФЕРЫ УСЛУГ: ЭКОНОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕГИОНОВ УЗБЕКИСТАНА	19
Мусаева Шоира Азимовна, Муйинжонов Хусейн Алишеревич	
МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПАНИЙ И ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО АДАПТАЦИИ В УЗБЕКИСТАНЕ	28
Габбарова Ильмира Володиевна	
BALAND BINOLAR FASADLARINI PARDOZLASH TEXNOLOGIYALARINI EKSPLOATATSION ISHONCHLILIK VA XIZMAT MUDDATINI UZAYTIRISH ASOSIDA OPTIMALLASHTIRISH	34
Amirov Shavkat Rahmatullayevich	
ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОГО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ ТУРИЗМА И ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТУРИСТСКОГО ПОТЕНЦИАЛА БУХАРСКОЙ ОБЛАСТИ	41
Усманова Азиза Баходировна	
PEREGONDAGI HARAKATNI BOSHQARISH TIZIMLARINI MIKROPROTSESSORLI TEXNOLOGIYALAR ASOSIDA TAKOMILLASHTIRILGAN TUZILMAVIY SXEMASINI ISHLAB CHIQISH	46
Xujamkulov Eldor G'ayratjon o'g'li	
INVESTITSIYALAR HAJMINI OSHIRISHGA QARATILGAN CHORA-TADBIRLAR VA ULARNI TAKOMILLASHTIRISH YO'LLARI	55
Alimova Dilafro'z Tohir qizii	
HUDUDLAR KESIMIDA AHOLI O'SISHINING BANDLIK DARAJASIGA TA'SIRINI EKONOMETRIK BAHOLASH (O'ZBEKISTON MISOLIDA)	61
Xusniddinova Gulnoza Ulug'bek qizi	
QUYOSH FOTOELEKTRIK PANELLARI SAMARADORLIGIGA ATROF-MUHIT OMILLARI VA CHANGLANISHNING TA'SIRI HAMDA ULARNI KAMAYTIRISHGA QARATILGAN INNOVATSION TEXNOLOGIYALAR	67
Botirov Bozorbek, Iskandarova Charos, Avazov Jonibek, Sultonov Abror	
O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI QISHLOQ XO'JALIGINI RIVOJLANTIRISHNING HOZIRGI HOLATI TAHLILI ..	75
Rajapov Xayrulla Bekdurdievich, Sharipova Lobar Umrbek qizi	
INTERPOLATSION TIKLASH ALGORITMLARINING OCR ANIQLIGIGA TA'SIRINI BAHOLASH	82
Aliyev Nodirbek Hamidullo o'g'li	
IKORXONALARDA KORPORATIV BOSHQARUVNI TAKOMILLASHTIRISHNING ZAMONAVIY YONDASHUVLARI VA INSTITUTSIONAL OMILLARI	90
Muxtorova Shaxlo Farxodovna	
O'ZBEKISTONDA QAYTA TIKLANUVCHI ENERGIYA MANBALARINING RIVOJLANISH ISTIQBOLLARINI EKONOMETRIK PROGNOZLASH	94
Qo'ziboyev Behzod Hamidovich	
KPI-BASED PERFORMANCE MANAGEMENT AND ITS IMPACT ON EMPLOYEE PRODUCTIVITY	99
Sultanova Kamila Mukhtorali kizi	
SANOAT KORXONALARI IQTISODIY XAVFSIZLIGINI TA'MINLASHDA MARKETING VOSITALARIDAN FOYDALANISH AMALIYOTINI TAKOMILLASHTIRISH	104
Tursunxo'jayev Sardor Jamoliddin o'g'li	
FARG'ONA VILOYATI MAHALLALARIDA TADBIRKORLIK VA HUNARMANDCHILIKNI RIVOJLANTIRISHNING IJTIMOY-IQTISODIY VA INSTITUTSIONAL OMILLARINI BAHOLASH	110
Tuxtasinov Zafarjon Odiljonovich	



MHXS STANDARTLARIGA O'TISH: KORXONALAR UCHUN AMALIY MUAMMOLAR VA YECHIMLAR	116
Eshniyazova Yulduz Yuldashbayevna	
TURMUSH FAROVONLIGINI BAHOLASHNING KO'P O'LCHOVLI USULLARI VA MEZONLARI	120
Turdikulova Moxira Maxmasharifovna	
KICHIK BIZNESNI RIVOJLANTIRISHNING MOLIVAVIY-IQTISODIY IMPERATIVLARI	125
Kaxorova Zamira Safaraliyevna	
YENGIL SANOAT KORXONALARIDA RO'Y BERISHI MUMKIN BO'LGAN BAXTSIZ HODISALAR VA UNI BARTARAF ETISH CHORA-TADBIRLARI	131
Dehqonov Oyatillo Mansurbek o'g'li, Abduraxmanov Abdurashid Ataxanovich	
VTULKA DETALINI ISHLAB CHIQRISHDA SHTAMPLASH TEXNOLOGIK JARAYONINI ISHLAB CHIQISH...	136
Abdullayev Fatxulla, Xasanov Kamoliddin, Yolg'ashova Madina, Jo'rayev Muhiddin	
JAHON MOLIVAVIY TIZIMINING TRANSFORMATSIYASI.....	140
Qobilova Nodira Qayumjon qizi, Normurodov X.E.	
KORXONALARDA "TEJAMKOR ISHLAB CHIQRISH" KONSEPSIYASIDAN FOYDALANISHNING XORIJ TAJRIBASI	144
Mamasoliyev G'ayratbek Maxamadyusupovich	
HUDUDIY BARQARORLIKNI TA'MINLASHDA MAHSULOT EKSPORTINI DIVERSIFIKATSIYALASH YO'LLARI.....	149
Mamadjanova Tuyg'unoy Axmadjanovna	
PAXTA-TO'QIMACHILIK KLASSTERLARIDA ISHLAB CHIQRISHNI DIVERSIFIKATSIYA QILISH ASOSIDA YUQORI QO'SHILGAN QIYMATLI MAHSULOTLAR ULUSHINI KENGAYTIRISH	154
Yusupova Feruza Yo'ldoshevna	
AHOLINING MOLIVAVIY SAVODXONLIGINI OSHIRISHDA MIKROLOYIHALARNING O'RNI	159
Irgashev Anvar Farxodovich	
XALQARO KOMPANIYALARDA INNOVATSION BOSHQARUV TIZIMLARINI RIVOJLANTIRISH STRATEGIYALARI.....	166
Raxmankulov Sherzod Shokirovich	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕГРАДАЦИИ КОМПОНЕНТОВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ: ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	171
Дыскин Валерий Григорьевич, Курбанов Юнус Муртаза угли, Жубаназаров Ринат Шапагат Улы	



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕГРАДАЦИИ КОМПОНЕНТОВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ: ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Дыскин Валерий Григорьевич

Кандидат наук, доцент кафедры
«Альтернативные источники энергии»
Ташкентского государственного технического университета
<https://orcid.org/0000-0002-4795-0586>

Курбанов Юнус Муртаза угли

Аспирант кафедры «Альтернативные источники энергии»
Ташкентского государственного технического университета.
<https://orcid.org/0009-0002-5546-5385>

Жубаназаров Ринат Шапагат Улы

Магистрант кафедры «Альтернативные источники энергии»
Ташкентского государственного технического университета.
rjubanazarov@gmail.com

Аннотация. Настоящий литературный обзор посвящён систематическому анализу современных научных исследований в области деградации компонентов фотоэлектрических модулей (ФЭМ-модулей) под воздействием климатических факторов. В работе рассмотрены основные механизмы деградации ключевых структурных элементов ФЭМ-модулей — инкапсулянта на основе этиленвинилацетата (EVA), защитного стекла, задней поверхности и металлических контактов — применительно к различным климатическим зонам: аридной, тропической, умеренной и горной. Проведён анализ количественных показателей скорости деградации, включая результаты метаанализа 80 первичных исследований, свидетельствующих о медианном значении 0,94 % в год.

Особое внимание уделено воздействию ультрафиолетового излучения (фотохимическая деградация, пожелтение инкапсулянта), высоких температур и термоциклирования (образование трещин в элементах, усталостные разрушения контактов), влажности (коррозия, потенциал-индуцированная деградация — PID), а также пылевого загрязнения поверхности. Рассмотрены современные диагностические методы: измерение ВАХ, ИК-термография, электролюминесцентная визуализация и спектроскопические методы.

Обобщены перспективные направления повышения долговечности модулей, включая применение полиолефиновых инкапсулянтов, УФ-стойкого стекла и систем мониторинга на основе искусственного интеллекта. Обзор охватывает 20 ключевых научных источников, опубликованных преимущественно в период 2019–2025 годов.

Annotatsiya. Ushbu adabiyotlar sharhi fotoelektrik (FE) modullar komponentlarining iqlim omillari ta'sirida degradatsiyalanishiga bag'ishlangan zamonaviy ilmiy tadqiqotlarni tizimli tahlil qilishga qaratilgan. Ishda FE modullarining asosiy strukturaviy elementlari — etilenvinilasetat (EVA) asosidagi inkapsulant, himoya oynasi, orqa qoplama va metall kontaktlarning turli iqlim zonalaridagi (arid, tropik, mo'tadil va tog'li iqlim) degradatsiya mexanizmlari ko'rib chiqilgan.

80 ta birlamchi tadqiqotni qamrab olgan meta-tahlil natijalari asosida degradatsiya tezligining miqdoriy ko'rsatkichlari tahlil qilinib, median qiymat yiliga 0,94 % ekanligi aniqlangan. Ultrabinafsha nurlanishning ta'siri (inkapsulantning fotokimyoviy degradatsiyasi va sarg'ayishi), yuqori harorat hamda termotsikllanish (elementlardagi yoriqlar, kontaktlarning eskirishi), namlik (korroziya va potentsial-induksiyalangan degradatsiya — PID), shuningdek, changlanish omillariga alohida e'tibor qaratilgan.

VAX o'lchash, IQ-termografiya, elektrolyuminescent tasvirlash va spektroskopik usullar kabi zamonaviy diagnostika

metodlari tahlil qilingan. Poliolefin inkapsulantlari, UB-bardoshli oynalar va sun'iy intellekt asosidagi monitoring tizimlarini qo'llash kabi istiqbolli yo'nalishlar umumlashtirilgan. Sharh asosan 2019–2025-yillarda nashr etilgan 20 ta asosiy ilmiy manbani qamrab oladi.

Abstract. This literature review presents a systematic analysis of contemporary scientific research on the degradation of photovoltaic (PV) module components under the influence of climatic factors. The study examines the primary degradation mechanisms of key structural elements — ethylene-vinyl acetate (EVA) encapsulant, protective glass, backsheet, and metallic contacts — across various climatic zones, including arid, tropical, temperate, and mountainous environments.

Quantitative degradation rate indicators are analysed, including the results of a meta-analysis of 80 primary studies, which revealed a median degradation rate of 0.94% per year. Particular attention is given to the effects of ultraviolet radiation (photochemical degradation and encapsulant yellowing), high temperatures and thermal cycling (cell cracking and contact fatigue failures), humidity (corrosion and potential-induced degradation — PID), as well as surface dust contamination.

Modern diagnostic techniques are reviewed, including I–V characterisation, infrared thermography, electroluminescence imaging, and spectroscopic methods. Prospective approaches to improving module durability are summarised, including the application of polyolefin encapsulants, UV-resistant glass, and AI-based monitoring systems. The review covers 20 key scientific publications, predominantly published between 2019 and 2025.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, деградация, климатические факторы, EVA-инкапсулянт, ультрафиолетовое излучение, потенциал-индуцированная деградация (PID), скорость деградации, термоциклирование, влажность, пылевое загрязнение, электролюминесцентная диагностика, долговечность ФЭМ-модулей, кристаллический кремний, полиолефиновые инкапсулянты.

ВВЕДЕНИЕ

Фотоэлектрические модули (ФЭМ-модули) являются ключевым компонентом современной возобновляемой энергетики. За последние два десятилетия суммарная установленная мощность солнечных электростанций в мире превысила 1 ТВт, что свидетельствует о стремительном росте отрасли и необходимости обеспечения долгосрочной надёжности эксплуатируемого оборудования. Производители ФЭМ-модулей, как правило, гарантируют сохранение не менее 80 % номинальной мощности в течение 25 лет эксплуатации. Однако реальная скорость деградации существенно зависит от климатических условий, типа применяемой технологии и конструктивных особенностей модуля.

Под деградацией ФЭМ-модулей понимается постепенное снижение электрической мощности и изменение электрических характеристик вследствие физических и химических процессов, протекающих под воздействием климатических факторов: солнечного излучения, в том числе ультрафиолетового, температуры, влажности, механических нагрузок — ветра, снега, града, а также атмосферных загрязнений — пыли и солей. Изучение механизмов деградации и их зависимости от климата позволяет разрабатывать более точные модели прогнозирования выработки электроэнергии, оптимизировать конструкцию модулей и снижать нормированную стоимость электроэнергии (LCOE).

Настоящий литературный обзор охватывает основные направления исследований в данной области за последние годы. В работе рассмотрены механизмы деградации ключевых компонентов модуля — солнечных элементов, инкапсулянта, задней поверхности и электрических контактов — в зависимости от климатических факторов, а также методы количественной оценки и прогнозирования скорости деградации.

Количественная оценка деградации ФЭМ-модулей в полевых условиях является предметом многочисленных исследований. Согласно результатам метаанализа, проведённого Phinikarides et al. [1], медианная скорость деградации кристаллических кремниевых модулей составляет порядка 0,5–0,7 % в год, однако реальные значения варьируются в широком диапазоне в зависимости от климатических условий места установки.

Масштабный метаанализ, основанный на 80 первичных исследованиях и 610 наблюдениях скоростей деградации, позволил установить медианное значение на уровне 0,94 % в год [2]. При этом было показано, что технология солнечного элемента, способ монтажа и методологические особенности исследования оказывают существенное влияние на полученные значения. Компиляция мировых данных о скоростях деградации различных технологий ФЭМ-модулей, выполненная в последние годы, позволила выявить зависимость этого показателя от климатической зоны и географического расположения объектов [3].

Жаркий и сухой климат, характерный для регионов Средней Азии, Северной Африки и Ближнего Востока, существенно ускоряет термическую деградацию компонентов модуля. Жаркий и влажный климат тропических регионов, в свою очередь, повышает вероятность коррозионных процессов и деляминации вследствие совместного действия высокой температуры и влажности. Умеренный климат



при прочих равных условиях характеризуется сравнительно низкими скоростями деградации [4].

Температура является одним из наиболее значимых климатических факторов, определяющих скорость деградации ФЭМ-модулей. В соответствии с уравнением Аррениуса скорость химических реакций деградации экспоненциально возрастает с повышением температуры. Термические циклы, обусловленные суточными и сезонными изменениями температуры окружающей среды, вызывают механические напряжения в структуре модуля вследствие различия коэффициентов теплового расширения его компонентов.

Установлено, что как экстремально холодный, так и экстремально жаркий климат способствует увеличению скорости деградации ФЭМ-модулей, а также распространению трещин в солнечных элементах [5]. Термоциклирование вызывает усталостные разрушения паяных соединений, расслоение инкапсулянта и деградацию металлических контактов. По данным многолетних полевых испытаний в пустынном климате Атакамы, деградация поликристаллических кремниевых модулей после 10 лет эксплуатации в основном обусловлена термическими воздействиями.

Важным аспектом температурного влияния является снижение эффективности модуля при повышении его рабочей температуры выше стандартных условий испытаний (STC, 25 °C). Типичный температурный коэффициент мощности для кристаллических кремниевых модулей составляет от $-0,35\%$ до $-0,45\%/^{\circ}\text{C}$. В условиях жаркого климата с высоким уровнем инсоляции рабочая температура модулей может превышать $70\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$, что приводит к существенным эксплуатационным потерям.

Анализ долгосрочных полевых данных, полученных в Лиме (Перу) для восьми различных ФЭ-технологий, показал, что тепловые потери для модулей на основе c-Si составляют от $-2,7\%$ до $-4,3\%$, тогда как тонкоплёночные модули демонстрируют более низкие тепловые потери — от $-2,2\%$ до $-2,6\%$ [6]. Температурные воздействия также проявляются в изменении температурных коэффициентов полевых модулей по сравнению с исходными значениями производителя, что было исследовано методом профилирования температурных коэффициентов для мультикристаллических модулей с 20-летним сроком эксплуатации [7].

Влажность является одним из основных факторов деградации ФЭМ-модулей, особенно в условиях жаркого и влажного климата. Она способствует ухудшению адгезии задней поверхности, повышает риск проникновения водяного пара в токопроводящие элементы и соединительные коробки, а также ускоряет коррозионные процессы. Коррозия соединительных коробок и металлических контактов активизируется под воздействием повышенной влажности и температурных колебаний.

Этиленвинилацетат (EVA) является наиболее распространённым инкапсулянтом в кристаллических кремниевых ФЭМ-модулях. Под воздействием ультрафиолетового излучения, высокой температуры и влажности EVA подвергается фотохимической деградации, проявляющейся в пожелтении, побурении, деламинации и изменении механических свойств [8]. Эти процессы снижают оптическое пропускание материала, что приводит к уменьшению тока короткого замыкания и общей мощности модуля.

Исследования механизмов деградации EVA показали, что под воздействием воды и/или ультрафиолетового излучения происходит гидролиз ацетатных групп с образованием уксусной кислоты, которая снижает уровень pH внутри модуля и ускоряет коррозию металлических контактов [9]. Основными механизмами фотохимической деградации EVA являются реакции по механизму Норриша II типа и процессы фотоокисления [10]. Для анализа химических изменений в деградировавших образцах инкапсулянта широко применяются спектроскопические методы — FTIR-ATR и рамановская спектроскопия.

Применение инкапсулянтов с высоким уровнем УФ-пропускания в ФЭ-модулях позволяет повысить выходную мощность примерно на 1% за счёт использования более широкого спектра солнечного излучения. Однако это также повышает чувствительность солнечных элементов к УФ-индуцированной деградации (UVID). Исследования влияния ультрафиолетового облучения на высокоэффективные кремниевые ФЭ-элементы различных архитектур (SHJ, IBC, PERT) показали линейное снижение мощности в ходе ускоренных испытаний, обусловленное деградацией пассивирующих слоёв [11].

Пожелтение ФЭМ-модулей под воздействием ультрафиолетового излучения наблюдается на протяжении нескольких десятилетий и представляет собой не только эстетическую проблему, но и фактор, существенно снижающий производительность модуля и эффективность фотозащиты, обеспечиваемой инкапсуляцией. Установлено, что деградация УФ-поглотителей приводит к образованию жёлтых хромофоров, влияющих на светопропускание к солнечному элементу. Это может вызывать снижение генерируемого тока до 4% после 4200 часов ускоренного УФ-старения [12]. В качестве перспективных решений для снижения УФ-деградации рассматриваются применение стекла с содержанием оксида церия и использование современных полиолефиновых (POE) инкапсулянтов [13].

Проникновение влаги в структуру ФЭ-модуля является одним из значимых факторов деградации, поскольку влага разрушает адгезионные материалы и взаимодействует с металлическими элементами

конструкции. Моделирование проникновения влаги через инкапсулянт методом конечных элементов с использованием атмосферных данных для различных климатических условий (в частности, Майами, Флорида) показало, что вследствие высокой диффузионной проницаемости EVA даже стеклянная задняя поверхность с низкой проницаемостью не способна полностью предотвратить значительное поглощение влаги через торцы модуля в течение 20–30-летнего срока эксплуатации [9]. После проникновения внутрь модуля влага конденсируется и ускоряет коррозию металлических компонентов.

Потенциал-индуцированная деградация (PID) представляет собой снижение КПД ФЭ-модулей под воздействием внешних электрических потенциалов и рассматривается как серьёзный фактор, влияющий на надёжность системы, особенно в условиях повышенной влажности. Потери мощности вследствие PID могут достигать 30 % [14]. Высокая влажность способствует миграции ионов натрия через инкапсулянт к поверхности солнечного элемента, вызывая шунтирование p–n-перехода.

Исследование влияния различных типов задних поверхностей и инкапсулянтов на восприимчивость к PID является актуальным направлением научных исследований. Установлено, что полиолефиновые инкапсулянты обладают более высоким объёмным сопротивлением и меньшей влагонепроницаемостью по сравнению с EVA, что способствует снижению риска PID-деградации [13]. Применение ускоренных стрессовых испытаний (AST) позволяет количественно оценивать устойчивость модулей к PID в различных климатических условиях.

Загрязнение поверхности ФЭМ-модулей пылевыми частицами является одним из ведущих факторов снижения производительности, особенно в аридных регионах. По данным комплексного обзора, охватывающего 175 научных публикаций, суммарные потери производительности вследствие совместного воздействия факторов окружающей среды — атмосферных осадков, солевого тумана, пыльцы, ветра, температуры, влажности, снегопадов, града, затенения и изменчивости солнечной инсоляции — могут достигать 60–70 % [4]. В частности, накопление снега способно вызывать ежегодные потери энергии до 12 %.

Анализ отказов ФЭ-модулей на основе методологии FMECA показал, что загрязнение пылью (коэффициент значимости — 9), затенение модуля (8) и влажность (7) относятся к наиболее значимым причинам деградации [10]. Пыль и снег вызывают потери, связанные с затенением, и снижение выходной мощности. Механические нагрузки — ветровые и снеговые — способствуют возникновению микротрещин в солнечных элементах, которые могут распространяться в процессе термоциклирования.

Охлаждение модулей воздушным потоком способно повысить выходную мощность до 14,25 % за счёт снижения рабочей температуры [4]. В то же время ветровая нагрузка может вызывать вибрацию и механические повреждения конструктивных элементов. Тропический климат с высокой солнечной инсоляцией и влажностью также способствует биологическому загрязнению поверхности модулей микроорганизмами и водорослями, что дополнительно снижает оптическое пропускание защитного стекла.

Для оценки состояния ФЭМ-модулей в полевых условиях применяется комплекс взаимодополняющих диагностических методов. Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) в стандартных условиях испытаний (STC) является основным методом количественного определения скорости деградации мощности. Визуальный осмотр позволяет выявлять видимые дефекты — пожелтение, деламинацию, трещины в стекле и солнечных элементах. Инфракрасная термография используется для обнаружения «горячих точек», перегрева диодов и неоднородностей распределения температуры [7].

Электролюминесцентная (ЭЛ) визуализация представляет собой высокочувствительный метод обнаружения трещин в элементах, деградации пассивирующих слоёв, повреждений металлических контактов и неоднородностей распределения тока. Деградировавший инкапсулянт способен снижать интенсивность ЭЛ-сигнала, достигающего регистрирующей камеры. Методы спектроскопии — FTIR-ATR, ИК-спектроскопия, масс-спектрометрия вторичных ионов (SIMS), рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS) — широко применяются для анализа химических изменений компонентов модуля на молекулярном уровне [7, 8].

Скорость деградации (DR) и скорость потерь производительности (PLR) являются ключевыми показателями долгосрочного мониторинга ФЭ-систем. Ансамблевые методы расчёта PLR, совмещённые с анализом климатических факторов, позволяют выполнять сравнительную оценку и прогнозирование выработки электроэнергии на 25-летний период [6]. Ускоренные стрессовые испытания (AST) в соответствии со стандартами IEC 61215 и IEC 62788 моделируют многолетнее климатическое воздействие в лабораторных условиях и используются для прогнозирования срока службы модулей.

Обширный массив данных полевых испытаний накоплен для различных климатических зон. Исследование надёжности кристаллических кремниевых модулей в суровых климатических условиях Алжира показало, что несмотря на более интенсивное УФ-облучение и высокие температуры в пустынном регионе Аддрар, модули в средиземноморской части Алжира подвергаются более интенсивной



деградации вследствие повышенной влажности [15]. Анализ производительности модулей после 12 лет эксплуатации в тропическом климате субсахарской Африки показал снижение тока короткого замыкания до 16,4 % и уменьшение коэффициента заполнения в диапазоне 11,3–24,2 % [17].

Долгосрочное исследование различных типов ФЭ-панелей в умеренном климате Стамбула продолжительностью более 10 лет показало, что разные типы панелей по-разному реагируют на воздействие окружающей среды. Тонкоплёночные панели оказались особенно чувствительными к влаге и ультрафиолетовому излучению, демонстрируя такие дефекты, как побурение [16]. Оценка надёжности инверторов PV-систем для трёх климатических зон — жаркой сухой, жаркой влажной и умеренной — показала, что климатические факторы существенно влияют на прогнозируемый срок службы силовой электроники [18].

Для условий Центральной Азии и аналогичных аридных регионов характерно сочетание высоких уровней инсоляции, значительных суточных перепадов температуры, повышенной запылённости атмосферы и относительно низкой влажности воздуха в континентальных районах. Эти условия формируют специфический профиль деградации, в котором доминируют термоциклирование, УФ-деградация инкапсулянта и загрязнение поверхности пылью, тогда как влияние влажностной деградации выражено в меньшей степени по сравнению с прибрежными и тропическими регионами.

Поиск альтернатив традиционному инкапсулянту EVA является актуальным направлением современных исследований. Разработаны новые материалы — силиконы, иономеры и инкапсулянты на основе полиолефинов (POE, TPO), демонстрирующие более высокую химическую стабильность по сравнению с EVA, меньшее пожелтение и лучшую устойчивость к воздействию влаги в процессе эксплуатации [13]. Полиолефиновые инкапсулянты обладают более высокой термической стабильностью и не выделяют уксусную кислоту в процессе деградации, что снижает риск коррозии контактов и развития PID-эффекта.

Применение стекла с оксидом церия позволяет снизить УФ-пропускание и защитить солнечные элементы от УФ-индуцированной деградации (UVID), однако его широкое использование ограничивается высокой энергоёмкостью производства и стоимостью [11]. Разработка антиотражающих и самоочищающихся покрытий защитного стекла направлена на снижение потерь, связанных с загрязнением поверхности. Системы мониторинга на основе искусственного интеллекта (ИИ) открывают новые возможности для прогнозирования деградации и оптимизации технического обслуживания ФЭ-систем [4].

Перспективным направлением является разработка двусторонних, или бифациальных, модулей, а также применение плавающих фотоэлектрических систем, позволяющих снижать рабочую температуру модулей за счёт конвективного охлаждения. Совершенствование методологии ускоренных стрессовых испытаний для более точной корреляции с реальными условиями эксплуатации в различных климатических зонах является необходимым условием разработки климатически адаптированных стандартов сертификации.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Проведённый анализ научной литературы свидетельствует о том, что деградация ФЭМ-модулей является многофакторным процессом, в котором климатические условия играют определяющую роль. Скорость деградации существенно варьируется в зависимости от климатической зоны: горячий и влажный климат ускоряет коррозию и PID-деградацию; горячий и сухой климат — термическую деградацию и пылевое загрязнение; экстремально холодный климат — механические повреждения, вызванные термоциклированием.

К числу ключевых механизмов деградации относятся: пожелтение и деламинация инкапсулянта EVA под воздействием УФ-излучения, температуры и влажности; коррозия металлических контактов вследствие проникновения влаги и образования уксусной кислоты; потенциал-индуцированная деградация при высокой влажности; образование трещин в солнечных элементах при термоциклировании; а также загрязнение поверхности пылью в аридных условиях.

Медианная скорость деградации кристаллических кремниевых модулей составляет порядка 0,5–0,94 % в год, однако в неблагоприятных климатических условиях этот показатель может значительно превышать указанные значения. Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку климатически адаптированных моделей деградации, совершенствование методов ускоренных испытаний и применение перспективных материалов с улучшенными характеристиками долговечности.

Особую актуальность представляет изучение деградации ФЭ-модулей в специфических климатических условиях Центральной Азии, характеризующихся высокими уровнями инсоляции,

значительной запылённостью и резкими суточными перепадами температуры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Phinikarides A., Kindyni N., Makrides G., Georghiou G.E. Review of photovoltaic degradation rate methodologies // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2014. — Vol. 40. — P. 143–152. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.155>
2. Caro C. et al. Determinants of the long-term degradation rate of photovoltaic modules: A meta-analysis // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2025. — Vol. 216. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115307>
3. Li M. et al. Compendium of degradation rates of global photovoltaic (PV) technology: Insights from technology, climate and geography // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. — 2025. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2025.113604>
4. Attoye D.E. et al. Impact of environmental factors on photovoltaic system performance, degradation, and economic viability // *Energy Strategy Reviews*. — 2025. <https://laas.hal.science/hal-04995018>
5. Aghaei M. et al. A Review of Photovoltaic Failure and Degradation Mechanisms // *Preprints.org*. — 2023. <https://doi.org/10.20944/preprints202311.0761.v1>
6. Gomes A.M.F. et al. Long-term field performance analysis of eight PV technologies in Lima, Peru // *Renewable Energy*. — 2025. — Vol. 251. — Article 123394.
7. Segbefia O.K., Akhtar N., Sætre T.O. Temperature profiles of field-aged photovoltaic modules affected by optical degradation // *Heliyon*. — 2023. — Vol. 9. — e20253. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20253>
8. Oliveira M.C.C. et al. The causes and effects of degradation of encapsulant ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) in crystalline silicon photovoltaic modules: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2018. — Vol. 81. — P. 2299–2317.
9. Kempe M.D. Investigation of the degradation and stabilization of EVA-based encapsulant in field-aged solar energy modules // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. — 1996. — Vol. 41–42. — P. 449–462. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(96\)00162-0](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(96)00162-0)
10. Rajput P. et al. A comprehensive review on reliability and degradation of PV modules based on failure modes and effect analysis // *International Journal of Low-Carbon Technologies*. — 2024. — Vol. 19. — P. 922–937. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctad106>
11. Sinha A. et al. UV-induced degradation of high-efficiency silicon PV modules with different cell architectures // *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. — 2023. — Vol. 31. — P. 36–51. <https://doi.org/10.1002/pip.3606>
12. Pinochet M. et al. Solar cell UV-induced degradation or module discolouration: Between the devil and the deep yellow sea // *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. — 2023. <https://doi.org/10.1002/pip.3725>
13. Mormile P. et al. New high UV transparency PV encapsulants: Properties and degradation after accelerated UV aging tests // *Polymer Degradation and Stability*. — 2025. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2025.111174>
14. Alam M.A. et al. Causes, consequences, and treatments of induced degradation of solar PV: A comprehensive review // *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*. — 2024. — Vol. 31(1). — P. 177–191. <https://doi.org/10.1080/25765299.2024.2318908>
15. Kaaya I. et al. Modeling outdoor service lifetime prediction of PV modules: Effects of combined climatic stressors on PV module power degradation // *IEEE Journal of Photovoltaics*. — 2019. — Vol. 9(4). — P. 1105–1112.
16. Atsu D. et al. 10-year performance and degradation analysis of different photovoltaic panels in the Istanbul, Türkiye environment // *Renewable Energy*. — 2025. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123474>
17. Atsu D., Seres I., Aghaei M., Farkas I. Analysis of long-term performance and reliability of PV modules under tropical climatic conditions in sub-Saharan Africa // *Renewable Energy*. — 2020. — Vol. 162. — P. 285–295. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.021>
18. Alavi O. et al. Assessing the impact of PV panel climate-based degradation rates on inverter reliability in grid-connected solar energy systems // *Heliyon*. — 2024. — Vol. 10(3). — e25839. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25839>
19. Sinha A. et al. Comparative investigation and analysis of delaminated and discolored encapsulant degradation in crystalline silicon photovoltaic modules // *Solar Energy*. — 2020. — Vol. 206. — P. 688–698. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.023>
20. Daher D.H., Gaillard L., Ménézo C. Experimental assessment of long-term performance degradation for a PV power plant operating in a desert maritime climate // *Renewable Energy*. — 2022. — Vol. 187. — P. 44–55. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.145>

muhandislik

& iqtisodiyot

ijtimoiy-iqtisodiy, innovatsion texnik,
fan va ta'limga oid ilmiy-amaliy jurnal

Ingliz tili muharriri: Feruz Hakimov

Musahhih: Zokir Alibekov

Sahifalovchi va dizayner: Abdurahmon Qurbonov

2026. № 5

© Materiallar ko'chirib bosilganda "Muhandislik va iqtisodiyot" jurnali manba sifatida ko'rsatilishi shart. Jurnalda bosilgan material va reklamalardagi dalillarning aniqligiga mualliflar ma'sul. Tahririyat fikri har vaqt ham mualliflar fikriga mos kelamasligi mumkin. Tahririyatga yuborilgan materiallar qaytarilmaydi.

"Muhandislik va iqtisodiyot" jurnali 26.06.2023-yildan
O'zbekiston Respublikasi Prezidenti Adminstratsiyasi huzuridagi
Axborot va ommaviy kommunikatsiyalar agentligi tomonidan
№S-5669245 reyestr raqami tartibi bo'yicha ro'yxatdan o'tkazilgan.
Litsenziya raqami: №095310.

**Manzilimiz: Toshkent shahri Yunusobod
tumani 15-mavze 19-uy**





+998 93 718 40 07



<https://muhandislik-iqtisodiyot.uz/index.php/journal>



t.me/yait_2100