

**ABU RAYHON BERUNIY NOMIDAGI URGANCH DAVLAT
UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**ABU RAYHON BERUNIY NOMIDAGI URGANCH DAVLAT
UNIVERSITETI**

BAZARBAYEV RUSTAM BAXRAMBOYEVICH

**OROL BO‘YI MINTAQASIDA KREMNIYLI QUYOSH ELEMENTLARIGA
TASHQI OMILLARNING TA‘SIRINI O‘RGANISH**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Urganch – 2025

**Fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD)
dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)
по физико-математическим наукам**

**Contents of dissertation abstract of doctoral philosophy (PhD) on
physical-mathematical sciences**

Bazarbayev Rustam Bahramboyevich

Orol bo‘yi mintaqasida kremniyli quyosh elementlariga tashqi omillarning ta‘sirini o‘rganish 3

Базарбаев Рустам Бахрамбоевич

Изучение влияния внешних факторов на кремниевые солнечные элементы в Приаральском регионе 21

Bazarbaev Rustam Bahramboyevich

Study of the influence of external factors on silicon solar cells in the Pre-Aral Sea region 41

E‘lon qilingan ishlar ro‘yxati

Список опубликованных работ
List of published works..... 45

**ABU RAYHON BERUNIY NOMIDAGI URGANCH DAVLAT
UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**ABU RAYHON BERUNIY NOMIDAGI URGANCH DAVLAT
UNIVERSITETI**

BAZARBAYEV RUSTAM BAXRAMBOYEVICH

**OROL BO‘YI MINTAQASIDA KREMNIYLI QUYOSH ELEMENTLARIGA
TASHQI OMILLARNING TA‘SIRINI O‘RGANISH**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Urganch – 2025

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B.2025.1.PhD/FM1272 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch davlat universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (<https://urdu.uz.uz>) hamda "ZiyoNet" Axborot-ta'lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:	Yakubov Komiljon Ruzmetovich fizika-matematika fanlari nomzodi, dotsent
Ilmiy maslahatchi:	Karajanov Smagul Jangabergenovich fizika-matematika fanlari doktori
Rasmiy opponentlar:	Aliyev Rayimjon Texnika fanlari doktori, professor Muratov Abat Seypullaevich Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), dotsent
Yetakchi tashkilot:	Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti

Dissertatsiya himoyasi Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch Davlat universiteti huzuridagi PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 raqamli Ilmiy kengashning 2025 yil "10" oktabr soat 14 : 00 dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 220100, Urganch sh., H.Olimjon ko'chasi, 14-uy. Tel.: (99862) 224-67-00; faks: (99862) 224-66-16; e-mail: info@urdu.uz).

Dissertatsiya bilan Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch Davlat universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (_____ - raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 220100, Urganch sh., H. Olimjon ko'chasi, 14-uy. Tel.: (99862) 224-67-00; faks: (99862) 224-66-16) e-mail: arm@urdu.uz.

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil "____" _____ da tarqatildi.

(2025 yil "____" _____ dagi _____ raqamli reestr bayonnomasi).



U.O. Kutliyev
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash raisi, f.-m.f.d., professor

U.P. Asatova
Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash ilmiy kotibi, PhD, dotsent

K.A. Ismaylov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi, f.-m.f.d., professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasiga avtoreferat)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda aholining elektr energiyasiga bo'lgan talabini qondirishda qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanish amaliyoti tobora kengayib, iqlim o'zgarishiga qarshi kurashish va energiya xavfsizligini ta'minlash ustuvor yo'nalishga aylangani uchun bu sohaga alohida ahamiyat berilmoqda. Hozirgi kunda rivojlangan mamlakatlarda energiya ta'minotining barqarorligini oshirish, iqlim o'zgarishlari oqibatlarini yumshatish va iqtisodiy o'sishni ta'minlash maqsadida quyosh energiyasi tizimlarining samaradorligini oshirish hamda ularning ekstremal tashqi muhit omillariga chidamliligini o'rganish bo'yicha fundamental va amaliy tadqiqotlar olib borilmoqda. Bu borada, jumladan yarimo'tkazgichli quyosh elementlarining ishlashiga chang, yuqori harorat, namlik hamda atmosferada mavjud bo'lgan korroziyaga sabab bo'luvchi tuzlar kabi agressiv omillarning ta'sirini o'rganishga alohida e'tibor qaratilmoqda.

Jahonda yarimo'tkazgichli quyosh panellarining keng qo'llanilishi bilan birga, ularning samaradorligi va ishonchligiga tashqi muhit omillarining salbiy ta'sirini kamaytirish bo'yicha keng ko'lamli ilmiy-tadqiqotlar olib borilmoqda. Ushbu yo'nalishda, jumladan chang to'planishi oqibatida yuzaning optik xususiyatlari yomonlashishini bartaraf etuvchi o'z-o'zini tozalovchi (gidrofobik, gidrofilik, antistatik) qoplamalarni yaratish, shuningdek, yuqori harorat va namlik kabi ekstremal iqlim sharoitlariga chidamli yangi avlod materiallari va panel konstruksiyalarini ishlab chiqish bo'yicha tadqiqotlar ustuvor hisoblanmoqda. Shu bilan birga, Orolbo'yi mintaqasi kabi ekologik jihatdan noqulay, ekstremal iqlimga ega hududlarda havo haroratining yuqori darajasi, uning tarkibidagi kimyoviy moddalar, xususan, tuz va kimyoviy aralashmalarning quyosh elementlari yuzasida korroziyaga olib kelishi hamda ularning optik va elektr xususiyatlarini pasaytirishini ilmiy jihatdan o'rganish dolzarb vazifalardan hisoblanmoqda.

Respublikamizda energiya mustaqilligini mustahkamlash, iqtisodiyot tarmoqlarini modernizatsiya qilish va "yashil iqtisodiyot" tamoyillariga o'tish borasida keng ko'lamli islohotlar amalga oshirilmoqda. 2022-2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekiston taraqqiyot strategiyasida, jumladan "Qayta tiklanuvchi energiya manbalarini keng joriy etish hisobiga elektr energiyasi ishlab chiqarish quvvatlari tarkibida ularning ulushini 25 foizga yetkazish va energiya samaradorligini oshirish"¹ bo'yicha vazifalar belgilangan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda Orolbo'yi mintaqasi kabi murakkab ekologik sharoitlarda (yuqori harorat, kuchli chang-to'zonlar, ayniqsa, tarkibida tuz va kimyoviy moddalar bo'lgan agressiv changlar ta'sirida) kremniyli quyosh elementlarining uzoq muddatli samaradorligini ta'minlash, ularning eskirishini oldini olish va himoya qilish usullarini ilmiy jihatdan asoslash hamda amaliy yechimlarini ishlab chiqish muhim hisoblanadi.

¹O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi PF-60-son "2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi Farmoni.

Mazkur dissertatsiyani bajarishda olingan ilmiy natijalar 2019-yil 22-maydagi “Energiya manbalaridan foydalanish to‘g‘risida”gi O‘RQ-539-son² qonuni, O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2017-yil 7-fevraldagi “O‘zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirish bo‘yicha Harakatlar strategiyasi to‘g‘risida”gi PF-4947-sonli va 2019-yil 8-oktyabrdagi “O‘zbekiston Respublikasi oliy ta‘lim tizimini 2030-yilgacha rivojlantirish Konsepsiyasini tasdiqlash to‘g‘risida”gi PF-5847-sonli Farmonlari, shuningdek, Prezidentning 2017-yil 20-apreldagi “Oliy ta‘lim tizimini yanada rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi PQ-2909-sonli, 2021-yil 19-martdagi “Fizika sohasidagi ta‘lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi PQ-5032-sonli, 2023-yil 17-fevraldagi “2023-yilda qayta tiklanuvchi energiya manbalarini va energiya tejoychi texnologiyalarni joriy etishni jadallashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida” gi PQ-57-son qarorlari³ hamda boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishda muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalar rivojlanishi ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Ushbu dissertatsiya ishi O‘zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalarni rivojlanishining III va IV: “Energetika, energoresurs tejamkorligi, transport, mashina va asbobsozlik, zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika va elektron asbobsozligini rivojlanishi” va “Qayta tiklanadigan energiya manbalaridan foydalanish usullarini ishlab chiqish, nanotexnologiya, fotonika va boshqa zamonaviy texnologiyalar asosida yangi texnologiyalar va qurilmalar ishlab chiqish” ustuvor yo‘nalishlari doirasida bajarildi.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi.

Jahonda quyosh fotoelektrik stansiyalarning samaradorligiga tashqi omillarning ta‘sirini o‘rganish va uning salbiy oqibatlarini kamaytirish bo‘yicha ilmiy tadqiqotlar jadal rivojlanmoqda.

Xorijlik olimlardan xitoylik Xingcai Li va uning hamkasblari aerodinamik quvurda o‘tkazilgan tajribalar orqali chang to‘planishining panel qiyalik burchagi va o‘rnatish masofasiga bog‘liqligi tahlil qilingan. Ruminiyalik olim Carmen Otilia Rusănescu o‘z tadqiqotlarida chang zichligining namlik va shamol tezligi kabi omillar bilan o‘zaro ta‘sirini ko‘rib chiqib, chang tarkibiga qarab samaradorlikning 7% dan 98% gacha pasayishini aniqlagan. Braziliyalik tadqiqotchi Alessandra Comerio chang tufayli yuzaga keladigan iqtisodiy yo‘qotishlarni miqdoriy baholagan bo‘lsa, Germaniyaning LUCA loyihasi doirasida Christian Opp va Michael Groll kabi olimlar Orolbo‘yi mintaqasidagi aerosol chang cho‘kindilarini bevosita yer usti monitoringi orqali o‘rganganlar.

O‘zbekistonlik olimlardan R. Avezova, A. Mirolimovlar tomonidan O‘zbekiston sharoitida changning quyosh panellari samaradorligiga umumiy ta‘siri baholangan. A. Mirolimov va X. Iliyevlar ilmiy ishlarida Toshkent sharoitida changning 330 W quvvatli fotoelektrik modullarga ta‘sirini o‘rganib, tozalanmagan panellarda quvvat

² <https://lex.uz/docs/-4346831> 22.05.2019-yildagi “Energiya manbalaridan foydalanish to‘g‘risida”gi O‘RQ-539-son O‘zbekiston Respublikasi qonuni

³ <https://lex.uz/uz/docs/-6385716> 17.03.2023-yildagi “2023-yilda qayta tiklanuvchi energiya manbalarini va energiya tejoychi texnologiyalarni joriy etishni jadallashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida” gi PQ-57-son O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining qarori

yo'qotilishi 25,4% ga yetishini aniqlaganlar. U.O. Odamov esa O'zbekiston iqlim sharoitida polikristall kremniyli panellarning uzoq muddatli ekspluatatsiyasi davomida eskirishga uchrashi, xususan, EVA plyonkasining sarg'ayishi kabi jarayonlarni tadqiq qilgan. Shuningdek, o'zbekistonlik va xorijlik olimlarning hamkorlikdagi tadqiqotlarida Orol dengizining qurishi natijasida yuzaga kelayotgan chang bo'ronlari panel samaradorligiga jiddiy ta'sir ko'rsatishi va chang cho'kish tezligini kuniga 260 mg/m² gacha oshirishi qayd etilgan.

Shu bilan birga, o'tkazilgan tadqiqotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, garchi hududiy changning umumiy tarkibi va uning fotovoltaiik tizimlariga salbiy ta'siri ma'lum bo'lsa-da, bevosita Orolbo'yi mintaqasi sharoitida to'planadigan changning o'ziga xos fizik-kimyoviy xususiyatlarining zamonaviy quyosh panellari yuzasidagi optik va termal parametrlarga miqdoriy ta'sirini, uning yillik dinamikasini va bu omil natijasida yuzaga keladigan uzoq muddatli eskirish mexanizmlarini baholashga qaratilgan kompleks tadqiqotlar yetarli darajada olib borilmagan.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi.

Dissertatsiya doirasida UZB-IND-2021-88 O'zbekiston-Hindiston hamkorlikdagi "Quyosh elementlarida foydalaniladigan nanotuzilmali gidrofobik va supergidrofobik materiallarni o'rganish" hamda PQ-307 qaror asosida moliyalashtirilgan "Quyosh panellariga turli tashqi omillarning ta'sirini kompleks o'rganish uchun kompyuterda boshqariladigan uskuna ishlab chiqarish" drayver loyihalari amalga oshirildi.

Tadqiqotning maqsadi Orolbo'yi mintaqasi misolida kremniyli quyosh panellari yuzasiga o'tiradigan chang miqdorini aniqlash, ularning kimyoviy tarkibini o'rganish, chang to'planishining yillik statistikasini olib borish, o'rnatilgan quyosh panellariga chang to'planishi, harorat, yoritilganlik ta'sirlarini tadqiq qilish, quyosh panellari samaradorligiga ta'sirini o'rganish va yarimo'tkazgichli quyosh panellariga atrof-muhit omillarini laboratoriya sharoitida o'rganish imkonini beruvchi uskuna yaratishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

quyosh panellari yuzasiga chang o'tirish tezligi va miqdorini yil davomida, fasllar kesimida kuzatish (2 ta hududda);

to'plangan chang morfologiyasi, kimyoviy tarkibi va fizik xususiyatlarini o'rganish;

kremniyli quyosh panellariga mazkur hudud iqlim sharoitlaridan kelib chiqib harorat ta'siri borasida nazariy va amaliy tadqiqotlar o'tkazish;

quyosh panellari yuzasiga chang to'planish natijasida yuzaga keladigan qizish effektlarini kuzatish;

yarimo'tkazgichli quyosh panellariga atrof-muhit ta'sirlarini SCAPS-1D dasturi yordamida o'rganish;

quyosh panellariga chang ta'sirini laboratoriya sharoitida tadqiq qilish imkonini beradigan qurilma ishlab chiqish;

Tadqiqotning obekti sifatida kremniyli quyosh elementlari va ular asosida yig'ilgan quyosh panellari olingan.

Tadqiqotning predmetini Orol bo'yi mintaqasi changining fizik-kimyoviy xossalari (tarkibi, morfologiyasi, o'lchami), uning to'planish dinamikasi va kremniyli

quyosh panellarining optik (shaffoflik) hamda elektrofizik (Voc, Isc, FIK, termal holat) parametrlariga ta'siri, harorat va yoritilganlikning panel parametrlariga ta'siri, shuningdek ushbu omillarning kompleks ta'sirini o'rganish metodologiyasi va laboratoriya qurilmasi tashkil qiladi.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqot jarayonida skanerlovchi elektron mikroskop (SEM), EDS, rentgen nurlari difraksiyasi (XRD), rentgen nurlari flouresens spektroskopiyasi (XRF), pH metr, infraqizil nurlar spektroskopiyasi (IR), Raman spektrometr, UV-Vis spektrometr, volt-amper tavsifnoma (VAT), Quyosh elementi sig'im silumyatori (Solar Cell Capacitance Simulator - SCAPS-1D), teplovizor kabi qurilma va o'lchash usullaridan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

Ilk marta Orolbo'yi va Xorazm mintaqasi sharoitida quyosh panellari yuzasida to'plangan changning fizik-kimyoviy xossalari (mineralogik tarkibi, zarracha morfologiyasi va o'lchami) kompleks tahlil qilindi. Natijada, chang tarkibida kvarts (SiO_2), kalsit (CaCO_3) va gematit (Fe_2O_3) kabi minerallar ustunlik qilishi hamda zarrachalarning o'tkir qirrali, notekis morfologiyasi panel yuzasida mikro-tirnalishlar va "issiq nuqta" (hot-spot)lar hosil qilishining asosiy sababchisi ekanligi ilmiy asoslab berilgan;

mintaqaviy chang to'planishining mavsumiy dinamikasi ilk bor miqdoriy jihatdan aniqlangan: ochiq hududlarda (Gurlan) chang zichligi $600-1200 \text{ mg/m}^2$, shahar sharoitida (Nukus) esa $80-1000 \text{ mg/m}^2$ gacha yetishi kuzatilib, bu tabiiy ifloslanish natijasida panel shaffofligining $\sim 20\%$ gacha pasayishiga olib kelishi eksperimental tasdiqlangan;

ilk marotaba Orolbo'yi mintaqasi uchun chang to'planishining mavsumiy dinamikasi turli iqlim omillari (harorat, namlik, yog'ingarchilik) bilan korrelyatsion tahlil qilingan. Tadqiqotlar chang massasining eng yuqori to'planishi quruq va issiq yoz-kuz oylariga to'g'ri kelishi isbotlangan, bu esa profilaktik tozalash ishlarini aynan shu davrlarda kuchaytirish zarurligi ilmiy asoslab berilgan;

yarimo'tkazgichli quyosh elementlari parametrlarining harorat, yoritilganlik va nuqsonlar konsentratsiyasiga bog'liqligi SCAPS-1D dasturida modellashtirildi. Nazariy hisoblashlar shuni ko'rsatdiki, nuqsonlar konsentratsiyasining 10^{10} sm^{-3} dan 10^{15} sm^{-3} gacha ortishi elementning foydali ish koeffitsiyentini 18% dan 9% gacha, ya'ni ikki barobarga pasaytirishi mumkinligi va bu natijalar laboratoriya tajribalari bilan yuqori aniqlikda mos kelishi isbotlangan;

mintaqaning o'ziga xos iqlim va chang sharoitlarini (harorat, yoritilganlik, chang miqdori, shamol tezligi) bir vaqtning o'zida nazorat qilib, kremniyli quyosh panellariga kompleks ta'sirini laboratoriya sharoitida tadqiq qilish imkonini beradigan qurilma ishlab chiqilgan. Ushbu qurilma tashqi omillarning panel eskirishiga sinergetik ta'sirini o'rganish va himoya qoplamalarini sinovdan o'tkazish uchun yangi eksperimental imkoniyat yaratadi.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

"Quyosh panelining elektrofizik va fotoelektrik parametrlarini kompleks o'lchash uchun qurilma" nomli № FAP 02337 foydali model uchun patent olingan;

orolbo'yi hududlarida kremniyli quyosh panellariga tashqi muhit ta'siri va samaradorligi kamayishi asoslangan;

quyosh panellariga tashqi omillarning ta'sirni laboratoriya sharoitida o'rganish imkonini beradigan qurilmada turli miqdordagi chang, harorat va yoritilganlik ta'sirida foydali ish ko'effitsiyentining o'zgarishi asoslab berilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi. Olingan natijalarning ishonchliligi yuqori aniqlikka ega bo'lgan, jahon amaliyotida faol qo'llaniluvchi elektr va fotosezgir asboblardan IR, Raman spektrometrlar, SEM, pH metr, XRD, tarozi, XRF, EDS, IR, Raman spektrometri, UV-Vis spektrometr, lyuksmetr, teplovizor va SCAPS-1D signalgan texnologiyalar asosida bajarilganligi bilan asoslanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.

Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati Orolbo'yi mintaqasiga xos bo'lgan changning fizik-kimyoviy xossalari - granulometrik tarkibi, morfologiyasi, mineralogiyasi va uning kremniyli quyosh panellari samaradorligiga ta'sir qilish mexanizmlarining ilk bor kompleks o'rganilganligi, harorat va yoritilganlikning panel parametrlariga ta'sirini SCAPS-1D dasturi yordamida modellashtirish orqali olingan nazariy natijalarning eksperimental ma'lumotlar bilan tasdiqlanganligi hamda mintaqaning murakkab iqlim sharoitlarini laboratoriya sharoitida hosil qilish imkonini beruvchi qurilmaning ishlab chiqilganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati Orolbo'yi mintaqasida quyosh elektr stansiyalarini loyihalash va samarali ekspluatatsiya qilish uchun ilmiy-asoslangan tavsiyalar ishlab chiqilganligi, xususan, panel sirtini tozalashning optimal davriyligini belgilash orqali ekspluatatsion xarajatlarni kamaytirish va energiya yo'qotishlarini minimallashtirish imkoniyati yaratilganligi, mintaqa sharoitiga mos himoya qoplamalarini yaratish uchun zarur ma'lumotlar bazasi shakllantirilganligi hamda ishlab chiqilgan laboratoriya qurilmasi yordamida yangi fotovoltaiik modullarni real sharoitlarga yaqinlashtirilgan holda sinovdan o'tkazish imkoniyatining yaratilganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarini joriy qilinishi.

Orol bo'yi mintaqasida kremniyli quyosh elementlariga tashqi omillarning ta'sirini o'rganish bo'yicha olingan ilmiy-amaliy natijalar asosida:

Kremniyli quyosh elementlarining elektrofizik parametrlariga harorat va yoritilganlik intensivligining ta'sirini eksperimental o'rganish va SCAPS-1D dasturi yordamida modellashtirish bo'yicha olingan miqdoriy natijalar va aniqlangan qonuniyatlar, shuningdek, turli konsentratsiyali nuqsonlarning element samaradorligiga va zaryad tashuvchilarning yashash vaqtiga ta'sirini baholovchi modellashtirish natijalaridan Namangan muxandislik-qurilish institutining "Fizika" kafedrasida 2017-2020 yillarga mo'ljallangan F2-21 "Kuchli elektromagnit maydondagi nanoo'lchamli yarimo'tkazgich parametrlariga harorat, deformatsiya va yorug'likning ta'siri" mavzusidagi fundamental davlat loyihasini bajarishda foydalanilgan (Namangan davlat texnika universitetining 1-may 2025-yildagi № 01/10-09/305 dagi ma'lumotnomasi). Olingan ilmiy natijalar nanoo'lchamli yarimo'tkazgich parametrlariga harorat va yorug'lik ta'sirini hisoblash hamda baholash imkonini bergan.

Kremniyli quyosh elementlarining keskin continental iqlim sharoitlaridagi xususiyatlariga oid olingan amaliy va nazariy natijalardan Hindistonning Madurai Kamaraj University ning Materialshunoslik kafedrasida (the Department of Material

Science) da bajarilayotgan CMRG2023BCH10069 raqamli “Hybrid Silicon Nanostructures for Multipurpose Application” nomli grant loyihasida foydalanilgan (Madurai Kamaraj University ma’lumotnomasi). Olingan nazariy va amaliy natijalar keskin kontinental sharoitlarda kremniy asosli quyosh elementlarining samaradorlig va xususiyatlarini o’rganish imkonini bergan.

Dissertatsiya ishi doirasida olingan ilmiy natijalar asosida Scopus va Web of Science bazalariga kirgan jurnallarda chop qilingan impakt-faktori 0.5 dan yuqori bo’lgan nufuzli xorijiy jurnallarda chop etilgan maqolalarda 11 marta havola qilingan. Olingan ilmiy natijalar ilmiy hamjamiyat tomonidan tan olingan va keyingi tadqiqotlar uchun asos bo’lib xizmat qilmoqda.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsiya ishi natijalari 9 ta xalqaro va 7 ta respublika miqyosidagi ilmiy va amaliy anjumanlarda muhokamadan o’tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e’lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo’yicha jami 19 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan, O’zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining dissertatsiyalar asosiy ilmiy natijalarni chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 3 ta maqola (Scopus bazasida indeksatsiyalangan jurnallarda), jumladan, 1 tasi respublika hamda xorijiy scopus bazasida indeksatsiyalangan jurnalda va 2 tasi xorijiy scopus bazasida indeksatsiyalangan jurnallarda nashr etilgan.

Intellectual mulk agentligi tomonidan EHM da qo’llanilish uchun 1 ta dasturiy mahsulot uchun guvohnoma va 1 ta foydali model uchun patent olingan.

Dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi. Dissertatsiyaning tarkibi kirish, uchta bob, umumiy xulosalar, foydalanilgan adabiyotlar ro’yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiya hajmi 122 betni tashkil etgan.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiyaning kirish qismida tanlangan mavzuning dolzarbligi, muammoning o'rganilganlik darajasi, tadqiqotni respublikada fan va texnologiya rivojlanishining ustuvor yo'nalishi bilan bog'liqligi, dissertatsiya ishining maqsadi va vazifasi, olingan natijalarning ilmiy yangligi, ilmiy va amaliy ahamiyati, ish natijasining joriy qilinganligi va aprobsiya hamda dissertatsiya hajmi va tuzilishi haqida qisqacha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“Adabiyotlar tahlili”** deb nomlangan I bobi ishning qisqacha adabiyotlar tahliliga bag'ishlangan bo'lib; unda kremniyli quyosh elementlari va panellarining ishlash prinsiplari, ularning samaradorligiga ta'sir etuvchi asosiy tashqi fizik omillar – xususan, harorat, yoritilganlik intensivligi va spektri, namlik hamda atmosfera changining ta'sir mexanizmlari jahon ilmiy adabiyotlaridagi so'nggi tadqiqotlar asosida chuqur tahlil qilingan. Bobda, shuningdek, Orol bo'yi mintaqasining o'ziga xos keskin kontinental iqlim sharoitlari, mintaqadagi atmosfera changining potensial manbalari (jumladan, Orolqum) va uning fotovoltaik tizimlar uchun tug'diradigan muammolari alohida ko'rib chiqilgan. Mavjud ilmiy ishlarda mintaqaviy changning fizik-kimyoviy xossalari va uning quyosh panellari parametrlariga miqdoriy ta'siri qay darajada o'rganilganligi baholanib, ushbu yo'nalishdagi mavjud bo'shliqlar va yechimini kutayotgan dolzarb ilmiy masalalar aniqlangan.

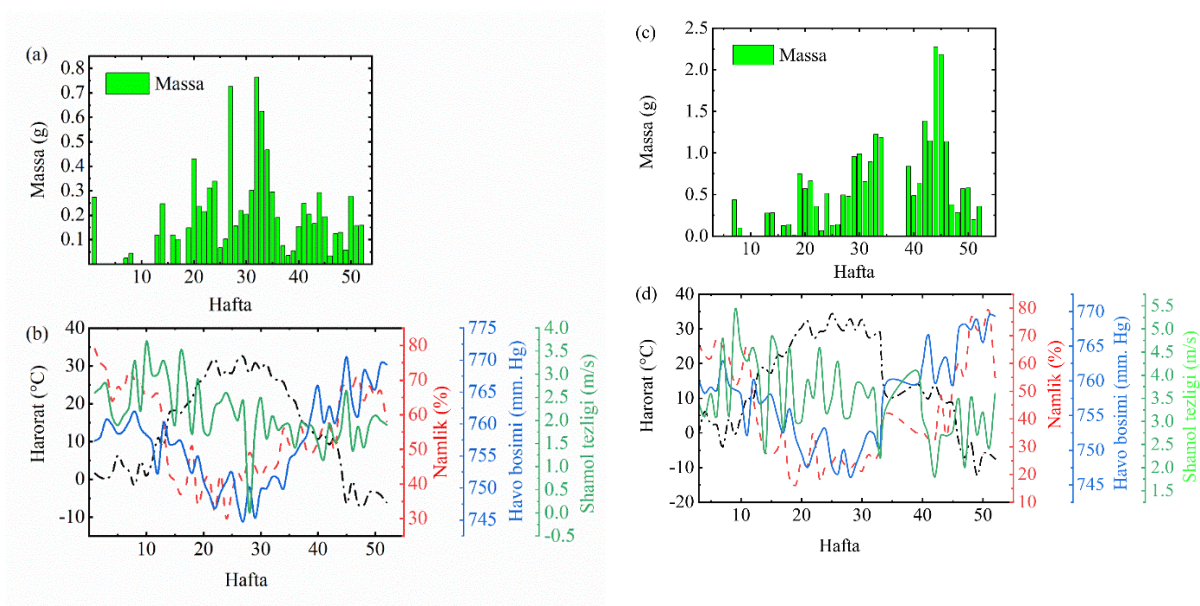
Bobning oxirida adabiyotlar tahlili yuzasidan olingan xulosalar, dissertatsiya ishining maqsadi va vazifalari keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“Yarimo'tkazgichli quyosh panellariga chang va atrof-muhit ta'sirini tadqiq qilish usullari”** nomli II bobida yarimo'tkazgichli quyosh panellari yuzasida chang to'planishi oqibatida ularning elektr parametrlari va samaradorligida yuzaga keladigan o'zgarishlarni baholash usullari, shuningdek, to'plangan changning morfologiyasi, zarracha o'lchamlari, kimyoviy va tarkibiy tuzilishi (SEM, Mastersize, Zetasizer, EDX, XRD, Raman va IR spektroskopik usullar yordamida) bo'yicha olib borilgan tadqiqotlar bayon etilgan. Bobda, bundan tashqari, quyosh panellariga harorat va yoritilganlik ta'sirini SCAPS-1D dasturida modellashtirish va olingan natijalarni tajriba ma'lumotlari bilan solishtirish jarayonlari batafsil yoritilgan, va quyosh panellari yuzasining termofotografik tahlili (infraqizil fotografiya) orqali nuqsonlarni aniqlash usullari hamda kremniyli quyosh panellariga atrof-muhit omillarining ta'sirini laboratoriya sharoitida o'rganish imkonini beruvchi uskuna ishlab chiqish prinsiplari va undan foydalanish metodologiyasi taqdim etilgan.

Dissertatsiyaning **“Orol bo'yi va Xorazm viloyati misolida yarimo'tkazgichli quyosh paneli yuzasida to'plangan chang tarkibi tahlili”** nomli III bobida yarimo'tkazgichli quyosh panellari yuzasida to'plangan changning miqdori, morfologiyasi, zarracha o'lchamlari va kimyoviy tarkibi chuqur tahlil qilingan. Shuningdek, changning quyosh panellari sirti shaffofligiga va ularning elektr parametrlariga ta'siri amaliy tajribalar asosida o'rganib chiqilgan.

Kremniyli quyosh panellari yuzasiga chang to'planish darajasini o'rganish maqsadida Orolbo'yi hududlaridan ikkita joy: Gurlan tumani (Xorazm viloyati) va Nukus shahri (Qoraqalpog'iston Respublikasi) da shisha panellar joylashtirildi. Shisha

namunalar sirtidan haftada bir marta chang namunalari yig'ib olindi va ularning massasi yozib borildi. Olingan chang to'planish natijalari grafigi 1-rasmda tasvirlangan. Tahlillar natijasida Gurlan tumanidagi qishloqda ochiq joyda joylashgan panelning birlik yuzasida (1 m^2) da 160 dan 1200 mg gacha, Qoraqalpog'istondagi Nukus shahridagi hovli joyda joylashgan panel yuzasida esa 80-1000 mg/m^2 gacha chang to'planishi kuzatildi.

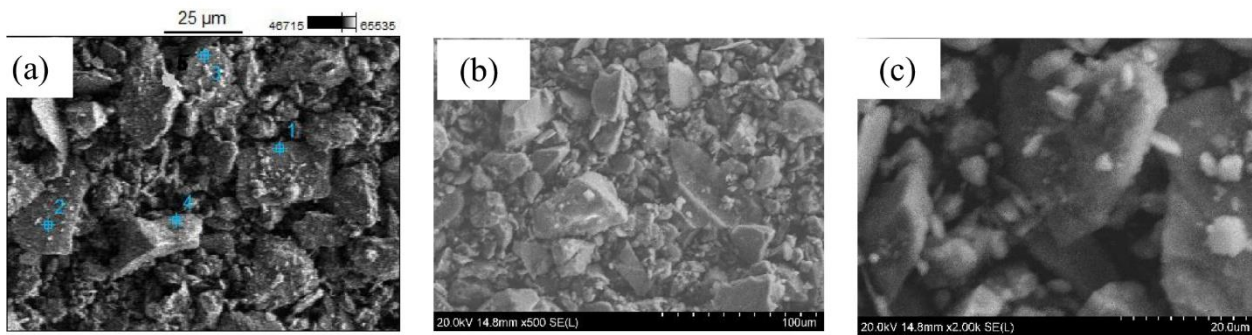


1-rasm. $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ yuzali (a) Xorazmda chekka hududda joylashgan va (c) Qoraqalpog'istondagi Nukus shaharida joylashgan shisha panel yuzasida yig'ilgan chang massasi. Chang 9-yanvar 2020-yildan boshlab haftasiga bir marotaba yig'ildi. Hafta raqamli absissa o'qida ko'rsatilgan. Rasmdagi (b) va (d) grafiklarda har bir hudud uchun harorat, namlik, havo bosimi va shamol tezliklari tasvirlangan.

Olingan natijalar tahlili asosida shisha panel yuzasida o'tiradigan chang miqdori haftalik o'rtacha harorat bilan yuqori darajadagi korrelyatsiyaga ega ekanligi aniqlandi. O'rtacha harorat katta bo'lgan haftalarda to'planadigan chang miqdori yuqoriligi kuzatildi. Bu esa harorat yuqori bo'lgan haftalarda quyosh panelining samaradorligi ikkita omil: harorat ta'sirida hamda chang to'planishi ta'sirida ham pasayishini anglatadi.

Yig'ilgan chang massasining hududlar kesimida tahlil natijalariga ko'ra yoz hamda kuz fasllarida qish va bahorga nisbatan miqdoridan eng ko'p chang to'planishi to'g'ri kelishi aniqlandi.

Yig'ilgan chang namunalarining morfologiyasi skanerlovchi electron mikroskop (SEM) yordamida tadqiq qilindi va chang zarralarining aniq geometrik shaklga ega emasligi, g'adir-budur ekanligi aniqlandi (2-rasm).



2-rasm. Chang zarralarning turli kattalashtirishda olingan SEM tasvirlari

Chang tarkibidaa nostandard shaklga ega bo'lgan ko'p zarralarning mavjudligi ularning o'zaro oralaridagi kuchlarning zaifligini ko'rsatadi, bu esa zarralarning samarali yopishmasligiga va shamol ta'sirida uzoq masofalarga ko'chishiga yordam beradi.

Chang zarralarining o'lchamlari Mastersize va Zetasizer qurilmalari yordamida tadqiq qilindi. Kuzatish natijasida eng katta zarra o'lchamlari $\sim 10 \mu\text{m}$ atrofida, eng kichik zarralarning o'lchamlari esa bir necha nanometrlar atrofida ekanligi aniqlandi. Shuningdek, deionizatsiyalangan suvda eritilgan chang zarralari o'lchamlarining taqsimoti vaqt o'tishi bilan o'zgarish kinetikasi 0, 90 hamda 150 daqiqadan keyin yozib olindi. Tahlillar shuni ko'rsatdiki, vaqt o'tishi bilan chang zarralarning o'lchamlari bo'yicha olingan taqsimot grafigi o'zgarishi kuzatildi, bunda taqsimot cho'qqisining qiymati siljidi. Cho'qqi qiymatining siljishi tarkibdagi ayrim tuzlarning erishi bilan tushuntiriladi. Buni eritman pH darajasining 0, 90 va 150 daqiqadan keyingi o'zgarishi tasdiqladi. Bu chang tarkibidagi CO_2 , CaO , MgO , Na_2O va P_2O_5 kabi birikmalarning suv bilan reaksiyaga kirishib, dispersiyaning kislotaligini o'zgartirganligi bilan bog'liqdir. Qolgan birikmalar, xususan SiO_2 , Al_2O_3 va Fe_2O_3 , xona haroratida suv bilan reaksiyaga kirishmaydi.

EDS tahlillari natijalari shuni ko'rsatdiki, to'plangan chang tarkibida eng ko'p miqdorda kislorod (O), kremniy (Si), kalsiy (Ca) va alyuminiy (Al) mavjud. Shuningdek, kamroq miqdorda kaliy (K), temir (Fe), magniy (Mg), natriy (Na), titan (Ti), xlor (Cl), fosfor (P) va oltingugurt (S) ham aniqlandi. Changning tarkibi rentgenoflouresensiya (XRF) va rentgen nurlari difraksion spektroskopiya (XRD) usullari yordamida tadqiq qilindi.

Rentgenoflouresent spektroskopiya (XRF) tahlili esa tarkibda katta miqdorda kvarts (SiO_2), CO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO va Na_2O lar qayd etilganini ko'rsatdi. Bundan tashqari, kichik sonli Zr, V, Co, Cr va Cu elementlari ham aniqlandi. Rentgen nurlari difraksiyasi (XRD) natijalari chang zarralarining asosiy cho'qqilari kvartsga (SiO_2) tegishli ekanligini tasdiqladi.

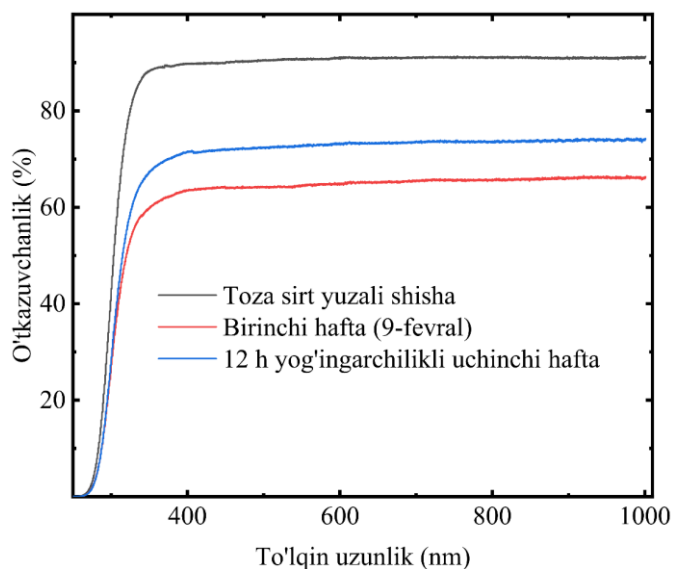
Chang tarkibining IR spektrlarida Si-O bog'lanishlarining cho'zilish ($900\text{-}1100 \text{ cm}^{-1}$) va egilish ($400\text{-}800 \text{ cm}^{-1}$) tebranishlariga xos cho'qqilar kuzatildi. Xususan, 800 cm^{-1} dagi yutilish Si-O-Si simmetrik cho'zilish tebranishiga, 694 cm^{-1} dagi yutilish esa Si-O simmetrik egilish tebranishlariga tegishlidir. Raman spektrida esa ~ 205 va 465 cm^{-1} da joylashgan cho'qqilar α -kvartsga to'g'ri kelishi aniqlangan, bu esa chang zarrachalarining asosiy qismi kvartsdan iboratligini tasdiqlaydi.

Quyosh paneli yuzasining chang bilan qoplanishi yorug'likni yutishni kamaytiradi va chang bilan qoplangan quyosh elementlarining qarshiligi ortadi, natijada elektr toki o'tishi hisobiga ular ko'proq issiqlik chiqaradi, bu esa "issiqlik nuqtalar" (hot spots) hosil bo'lishiga olib keladi.

Qizigan kremniyli quyosh elementlarini aniqlash maqsadida infraqizil fotografiya (termofotografik tahlil) usuli qo'llanilgan. Ushbu tadqiqot doirasida Urganch davlat universitetida Talesun firmasidan olingan monokristall kremniyli quyosh elementlari (156×156 mm) asosida 24 ta ketma-ket ulangan kremniyli quyosh moduli yig'ildi. Yig'ilgan quyosh modulining foydali ish koeffitsiyenti dastlab ~8% atrofida bo'lgan, bu laboratoriya sharoitida yig'ish va ilg'or payvandlash stanoklarining yo'qligi bilan izohlanadi. Yig'ilgan quyosh panelining bir elementi chang bilan butunlay qopnadi va uning issiqlik tasviri kuzatildi. Termal tasvirlar chang bilan qoplangan quyosh elementlarining sezilarli darajada qiziganligini yaqqol ko'rsatgan, chunki chang qatlami yorug'lik nurlanishini cheklab, elementning qarshiligini oshiradi va tok o'tishi natijasida shu qismi qizadi. Shuningdek, quyosh paneli yuzasidagi chang miqdorining ortishi bilan qisqa tutashuv toki (I_{sc}), salt yurish kuchlanishi (V_{oc}) va samaradorlikning chiziqli ravishda kamayishiga olib keldi.

Qoraqalpog'iston va Xorazm hududlarida changning shisha panel shaffofligiga ta'sirini o'rganish maqsadida o'lchami $2.5 \times 7.5 \text{ cm}^2$ bo'lgan shisha namunalar joylashtirildi.

Standart PV modullarining shisha o'tkazuvchanlik spektrlari 92% ni tashkil etsada, chang bo'roni va ifloslanish tufayli bu quruq ob-havoda 30% dan ko'proq kamayishi mumkinligi aniqlangan (3-rasm). Ikki oy mobaynida chang to'planishi shisha panel sirti shaffofligini 20% gacha kamaytirdi, biroq yog'ingarchilik paytida shaffoflik 10% ga yaxshilanishi kuzatildi (3-rasm).

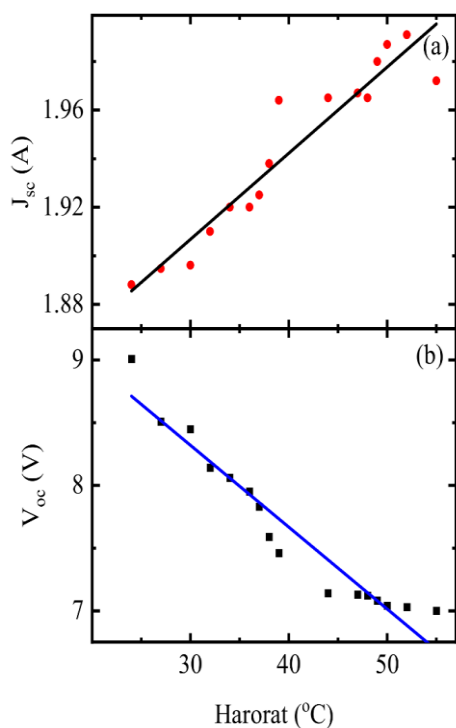


3-rasm. Toza yuzali (-), (-) quruq atmosfera sharoitida bir hafta davomida qoldirilgan, (-) ikki hafta davomida qoldirilgan bunda 12 soat yog'ingarchilik kuzatilgan shisha namunalarning shaffofliklari

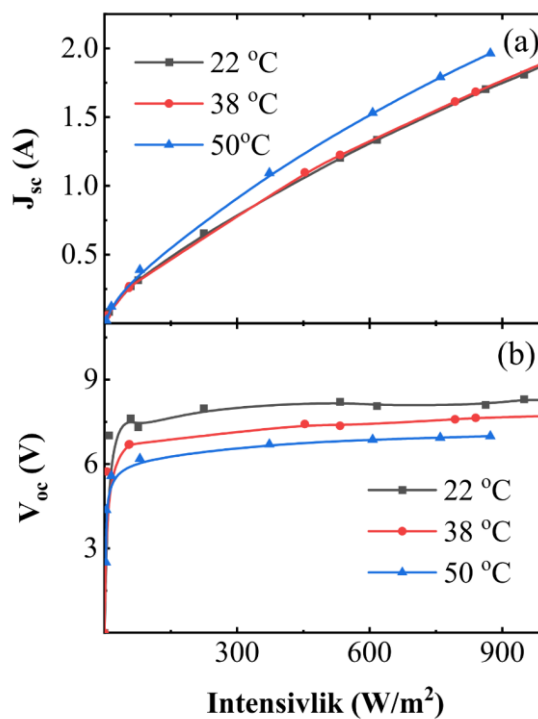
Chang zarralarining submikron o'lchamlarda ko'pligi inobatga olinsa, mikrometr darajadagi teksturali shisha yuzalari chang cho'kishini oshirishi mumkin, bu esa quyosh paneli shishasining tekstura o'lchamini va tozalash usulini tanlash muhimligini ko'rsatadi.

To'rtinchi bob "Yarimo'tkazgichli quyosh panellariga atrof-muhit ta'sirini tadqiq qilish usullari" deb nomlanib, unda Orolbo'yi mintaqasida to'plangan changning quyosh panellarining optik va termal xususiyatlariga ta'sirini o'rganishdan tashqari, changning hamda mintaqa uchun xos bo'lgan boshqa muhim atrof-muhit omillari – harorat va yoritilganlikning yarimo'tkazgichli quyosh elementlari va panellarining fundamental elektrofizik parametrlariga (salt yurish kuchlanishi - V_{OC} , qisqa tutashuv toki - I_{SC} , foydali ish koeffitsiyenti - FIK) bevosita va miqdoriy ta'siri aniqlangan.

Tadqiqot vazifasi sifatida Orolbo'yi hududida quyosh paneli samaradorligini haroratga bog'liqligi laboratoriya sharoitida quyosh panellariga tashqi omillar ta'sirini o'rganish imkonini beradigan qurilma yordamida o'rganildi. Tadqiqotlar 0-100 mW/cm² intensivliklar oralig'ida va 22-50 °C harorat o'zgarishlarida amalga oshirildi. 4-rasmda tadqiqot natijasi sifatida olingan qisqa tutashuv toki (J_{SC}) va salt yurish kuchlanishi (V_{OC}) larining harorat funksiyasi sifatida o'zgarishlar natijalari keltirilgan.



4-rasm. Qisqa tutashuv toki (a) va salt yurish kuchlanishi (b) larning haroratga bog'liqligi



5-rasm. Qisqa tutashuv toki (a) va salt yurish kuchlanishi (b) larning yoritilganlikka bog'liqligi

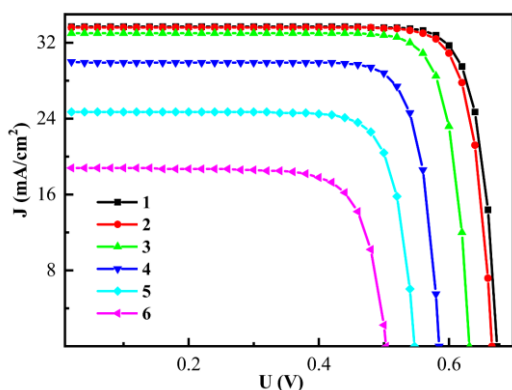
Tahlillar shuni ko'rsatadiki, harorat ortishi bilan J_{SC} biroz ortgan, V_{OC} esa chiziqli kamaygan. Qisqa tutashuv tokidagi o'zgarish juda kichik bo'lsa-da, salt yurish kuchlanishi 0–50 °C harorat oralig'ida taxminan 20% ga kamayadi, bu esa sezilarli darajadagi o'zgarish hisoblanadi.

5-rasmda qisqa tutashuv oqimi va salt yurish kuchlanishining turli haroratlarda ($T = 22$ °C, $T = 38$ °C, $T = 50$ °C) yoritish intensivligiga bog'liqligi ko'rsatilgan. Tahlil natijalariga ko'ra, yoritilganlik ortishi bilan J_{SC} ning chiziqli ortdi va bunda V_{OC} ning esa subchiziqli ortishi kuzatildi. Kutilganidek, J_{SC} va V_{OC} lar yoritilganlik (I_0) ga sezilarli bog'liq ekan.

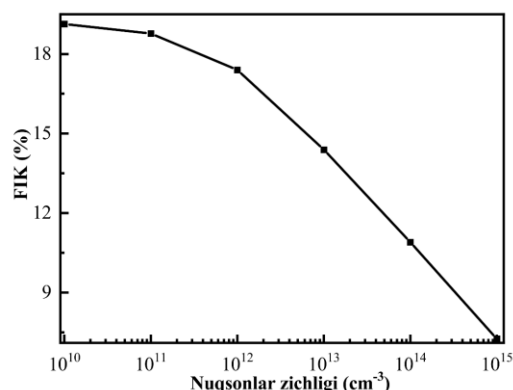
Kremniyli quyosh panellari samaradorligiga elementlar tarkibidagi nuqsonlar qanday ta'sir qilishini o'rganish maqsadida SCAPS-1D dasturida turli nuqsonlar konsentratsiyasida quyosh panellarining samaradorligining qanday o'zgarishi modellashtirildi.

Yarimo'tkazgich strukturasi nuqsonlar konsentratsiyasi ortishi zaryad tashuvchilar yashash vaqtining kamayishi kuzatildi.

6-rasmda turli yarimo'tkazgichli quyosh elementi tarkibida turli xil konsentratsiyali nuqsonlar bo'lgandagi quyosh elementining volt-amper tavsifnomasi keltirilgan. Bunda nuqsonlar zichligi 10^{10} cm^{-3} dan 10^{15} cm^{-3} gacha 10 martadan orttirib borildi.



6-rasm. Turli nuqsonlar konsentratsiyasida kremniyli quyosh elementining volt-amper tavsifnomasi.



7-rasm. Turli nuqsonlar konsentratsiyasida kremniyli quyosh elementi foydali ish ko'effitsiyentining o'zgarishi.

Buni 7-rasmdagi turli nuqsonlar konsentratsiyalarida kremniyli quyosh elementi foydali ish ko'effitsiyentining kamayish grafigi natijalari tasdiqlaydi.

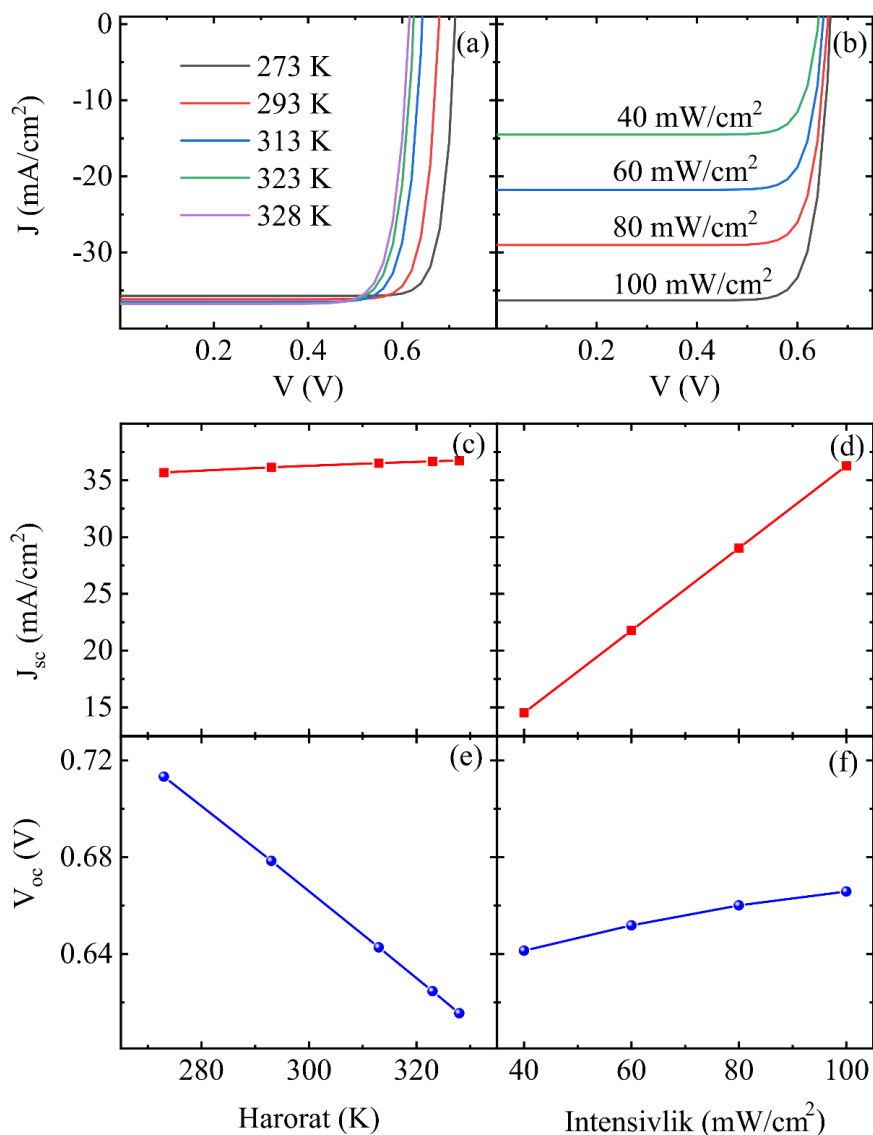
8-(a) va (b) rasmlarda har xil harorat va yoritilganlik o'zgarishlarida SCAPS-1D dasturida modellashtirish yordamida olingan tok-kuchlanish bog'liqliklari keltirilgan.

Ko'rish mumkinki, haroratning 22–50 °C oralig'ida ortishi bilan J_{SC} (8 (a) (c) rasm)ning biroz ortishi va V_{OC} ning sezilarli kamayishi (8 (a) va (c)) kuzatildi va bu tajribada kuzatilgan natijalar bilan mos keladi (8-rasm (a) va (b)). Nazariy modellashtirishda zaryad tashuvchilar yashash vaqti va diffuziya uzunligi haroratga bog'liq emas deb taklif qilinadi, bu esa J_{SC} va J_0 larning ham haroratga bog'liq emasligini ko'rsatadi. Shunga ko'ra, (2) tenglamaga muvofiq V_{OC} harorat ortishi bilan

chiziqli ortadi (8-rasm (e)). Shuningdek, J_{SC} ning I_0 oshishi bilan keskin oshishini [8 (b) va (d)-rasmlar] va V_{OC} ning esa I_0 ga kuchsiz bog‘liqligini ko‘rish mumkin (8 (b) va (f) rasmlar).

$$J_{sc} \approx J_{ph}(T) = \frac{G}{G_{ref}} [J_{ph,ref} + \mu_{J_{sc}}(T - T_{ref})] \quad (1)$$

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{J_{sc}}{J_0} \right) \quad (2)$$



8-rasm. SCAPS-1D dasturida modellashtirish natijasida tok-kuchlanish va qisqa tutashuv toki va salt yurish kuchlanishlarining harorat va yoritilganliklarga bog‘liqlilari.

Qisqa tutashuv tokining toza yuzali hamda chang bilan qoplangan holdagi quyosh paneli uchun o‘lchangan qiymati grafigi 9-rasmda keltirilgan. Grafikdan ko‘rish mumkinki, yoritilganlik ortishi bilan chang bilan qoplangan va toza yuzali quyosh panellari qisqa tutashuv toklari qiymatlari farqi ortib boradi. Kichik yoritilganlik

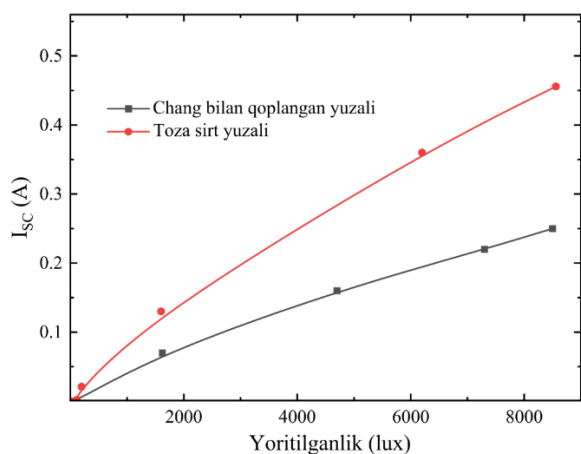
sharoitlarida bu qiymatlar orasidagi farq juda kichik. Bu shuni ko'rsatadiki, changning to'planishi quyosh panelining yorug'lik yutilishini susaytiradi va uning quvvat chiqishini kamaytiradi. Ikkala holdagi quyosh panelining o'lchagan salt yurish kuchlanishi grafigi (qarang 10-rasm) shuni ko'rsatadiki, yorug'lik intensivligi ortishi bilan salt yurish kuchlanishi qiymatlari orasidagi farq juda kichik. Umumiy holda shuni aytish mumkinki, quyosh panellari yuzasiga chang to'planishi natijasida qisqa tutashuv toki salt yurish kuchlanishiga qaraganda ko'proq kamayar ekan.

Ushbu quyosh panelining qisqa tutashuv toki va salt yurish kuchlanishlarining o'zgarishlarining yuzadagi chang qatlamiga bog'liqligini quyidagi formulalar bilan ifodalanadi:

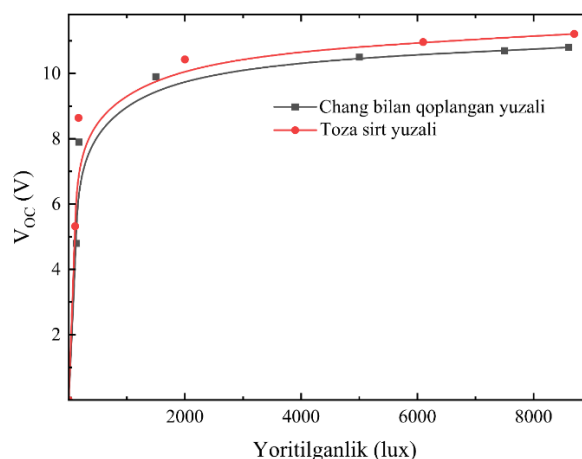
$$I_{sc}(d, G) = kG(1 - e^{-\alpha d}) \quad (3)$$

$$V_{oc} = V_{oc,ref} + K_V(T - T_{ref}) + \frac{nkT}{q} \left[\ln \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) - \alpha d \right] \quad (4)$$

bunda G – panel sirtiga tushayotgan yoritilganlik, k – proporsionallik koeffitsiyenti bo'lib, panelning fizik xususiyatlariga bog'liq, d – chang qatlami qalinligi. (3) va (4) tenglamalardan tutashuv toki chang qatlami bilan chiziqli, salt yurish kuchlanishi esa logarifmik bog'liq ekanligini ko'rish mumkin.

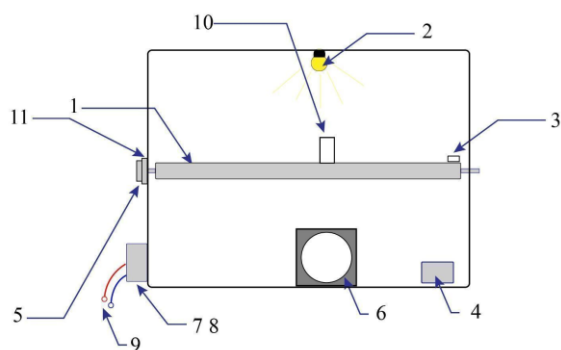


9-rasm. Toza yuzali va chang bilan qoplangan kremniyli quyosh paneli qisqa tutashuv tokining yoritilganlikka bog'liqlik grafigi

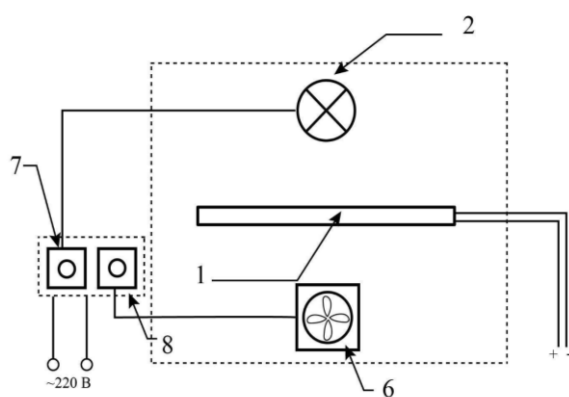


10-rasm. Toza yuzali va chang bilan qoplangan kremniyli quyosh paneli salt yurish kuchlanishining yoritilganlikka bog'liqlik grafigi

Dissertatsiya ishi natijasi sifatida quyosh panellariga atrof-muhit omillari ta'sirini o'rganish imkoniyatini beradigan qurilma yasaldi va unga foydali model uchun patent olindi. Qurilma yorug'lik tushish burchagini o'zgartirish, yoritilganlikni 0 dan 1000 W/m² gacha o'zgartirish, shamol tezligini o'lchash orqali quyosh paneli yuzasiga shamol ta'sirida chang o'tirish tezligini o'lchash va quyosh elementlari yuzasiga chang o'tirishi, ularning samaradorligiga ta'sirini o'rganish imkoniyatini beradi.



11-rasm. Foydali model qurilmasining old tomondan ko'rinish chizmasi



12-rasm. Foydali model qurilmasining elektr ulanish sxemasi

Qurilma korpusi toblangan shishadan yasalgan bo'lib, korpus ichki qismi o'rtasiga 1 quyosh fotovoltaiik paneli qiyalik burchagini o'zgartirish imkonini beradigan 5 torsovoy mexanizm yordamida mahkamlangan.

Ushbu uskuna yordamida quyosh panellariga tashqi omillar ta'sirini panelning qiyalik burchagi va yoritilganlikni o'zgartirgan holda o'rganish imkoniyati mavjud.

XULOSA

1. Orolbo'yi mintaqasida chang to'planishining miqdoriy va mavsumiy qonuniyatlari aniqlandi. Kuzatuvlar natijasida changning sirtiy zichligi ochiq hududlarda (Gurlan) 600-1200 mg/m², shahar sharoitida (Nukus) esa 80-1000 mg/m² ni tashkil etishi miqdoriy jihatdan tasdiqlandi. Chang to'planishining maksimal darajasi yoz va kuz fasllariga to'g'ri kelishi, bu esa ifloslanishning yuqori harorat va quruq iqlim sharoitlariga bevosita bog'liqligini ko'rsatildi.

2. Chang zarralarining morfologiyasi va mineralogik tarkibining panel samaradorligiga ta'sir mexanizmlari asoslandi. SEM, XRD va EDX tahlillari changning notekis, o'tkir qirrali morfologiyaga ega ekanligini va uning tarkibida asosan kvarts (SiO₂), kalsit (CaCO₃) va gematit (Fe₂O₃) mavjudligini ko'rsatdi. Bu natijalar changning panelga ta'sirini optik yo'qotishlar hamda termal yo'qotishlar hisobiga yuz berishi aniqlandi.

3. Chang qatlamining optik o'tkazuvchanlikka ta'siri miqdoriy baholandi. Ikki oylik tabiiy ifloslanish natijasida panel shishasining integral optik o'tkazuvchanligi toza holatga nisbatan ~20% gacha pasayishi aniqlandi. Yog'ingarchilikdan so'ng bu ko'rsatkich qisman (~10%) tiklanishi kuzatildi. Shaffoflikning pasayishi yarimo'tkazgichga tushayotgan fotonlar oqimini kamaytirib, qisqa tutashuv tokining pasayishining asosiy fizik sababi hisoblanishi ko'rsatildi.

4. "Issiq nuqta" (Hot-spot) effektining yuzaga kelishi eksperimental tasdiqlandi. Notekis changlanish natijasida ayrim yarimo'tkazgichli quyosh elementlarining soylanishi ularning zanjirda teskari yo'nalishda ulangan yuklamaga aylanishiga olib kelishi va bunda Joule issiqligi hisobiga kuchli lokal qizish yuzaga kelishi termografik tahlil orqali isbotlandi. Bu hodisa panelning uzoq muddatli eskirishining asosiy mexanizmlaridan biri ekanligi ko'rsatildi.

5. Harorat va yoritilganlikning kremniy quyosh elementining asosiy elektrofizik parametrlariga ta'siri o'rganildi. Tajribalar va SCAPS-1D modellashtirish natijalari haroratning 22°C dan 50°C gacha ortishi salt yurish kuchlanishining (V_{oc}) chiziqli kamayishiga, yoritilganlikning 0-200 W/m² oralig'ida ortishi esa qisqa tutashuv tokining (I_{sc}) deyarli chiziqli, V_{oc} ning esa logarifmik qonuniyat bo'yicha ortishiga olib kelishini ko'rsatdi. Bu natijalar yarimo'tkazgichlar fizikasining fundamental qonuniyatlariga to'liq mos keladi.

6. Yarimo'tkazgichdagi nuqsonlar konsentratsiyasining panel samaradorligiga ta'siri miqdoriy modellashtirildi. SCAPS-1D dasturi yordamida nuqsonlar konsentratsiyasining 10¹⁰ cm⁻³ dan 10¹⁵ cm⁻³ gacha ortishi zaryad tashuvchilarning yashash vaqtini (τ) keskin kamaytirishi isbotlandi. Bu, o'z navbatida, Shockley-Read-Hall (SRH) rekombinatsiyasini kuchaytirib, quyosh elementining foydali ish koeffitsiyentini 18% dan 9% gacha, ya'ni ikki barobarga pasaytiradi.

7. Yangi laboratoriya qurilmasi yaratildi va uning samaradorligi tasdiqlandi. Tashqi muhit omillarining (chang, harorat, yoritilganlik, shamol) yaimo'tkazgichli quyosh panellariga kompleks ta'sirini nazorat qilinadigan sharoitda o'rganish imkonini beruvchi original laboratoriya qurilmasi ishlab chiqildi va unga O'zbekiston Respublikasi Intellektual mulk agentligining foydali model uchun № FAP 02337 raqamli patenti olindi. Bu qurilma yordamida yarimo'tkazgichli quyosh panellariga turli yoritilganlik, harorat, namlik va chang ta'sirini laboratoriya sharoitida o'rganish imkoni mavjud.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ УРГЕНЧСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ ИМЕНИ АБУ РАЙХАНА БЕРУНИ**

**УРГЕНЧСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АБУ
РАЙХАНА БЕРУНИ**

БАЗАРБАЕВ РУСТАМ БАХРАМБОВИЧ

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА КРЕМНИЕВЫЕ
СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ПРИАРАЛЬСКОМ РЕГИОНЕ**

01.04.10- Физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD) ПО
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК**

Ургенч – 2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером № В.2025.1.PhD/FM1272.

Диссертация выполнена в Ургенчском государственном университете имени Абу Райхана Беруни.

Автореферат диссертации на трёх языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещён на веб-странице Научного совета по адресу <https://urdu.uz> и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» по адресу www.ziynet.uz.

- Научный руководитель:** **Якубов Комилжон Рузметович**
кандидат физико-математических наук, доцент
- Научный консультант:** **Каражанов Смагул Джангабергенович**
доктор физико-математических наук
- Официальные оппоненты:** **Алиев Райимжон**
доктор технических наук, профессор, профессор
- Муратов Абат Сейпуллаевич**
Доктор философии (PhD) по физико-математическим наукам, доцент
- Ведущая организация:** **Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова**

Защита диссертации состоится « 10 » октябрь 2025 года в 14 : 00 часов на заседании Научного совета PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 при Ургенчском государственного университет имени Абу Райхана Беруни. (Адрес: 220100, г. Ургенч, ул. Х. Алимджана, дом 14. Тел.: (99862)224-66-11, факс: (99862) 224-67-00, e-mail: info@urdu.uz)

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ургенчского государственного университет имени Абу Райхана Беруни (зарегистрирована за № _____). (Адрес: 220100, г. Ургенч, ул. Х.Алимджана, дом 14. Тел.: (99862) 224-66-11, факс: (99862) 224-67-00). e-mail: arm@urdu.uz.

Автореферат диссертации разослан « _____ » _____ 2025 года.

(протокол рассылки № _____ от « _____ » _____ 2025 года).



У.О. Кутлиев
Председатель Научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

У.П. Асатова
Ученый секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней, PhD, доцент

К.А. Исмаилов
Председатель научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация к диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире практика использования возобновляемых источников энергии для удовлетворения возрастающих потребностей населения в электроэнергии приобретает всё более широкий характер, поскольку данное направление рассматривается в качестве одного из приоритетных в глобальной стратегии по противодействию изменениям климата, снижению экологических рисков и обеспечению энергетической безопасности. В связи с этим особое внимание уделяется проведению как фундаментальных, так и прикладных исследований, направленных на совершенствование солнечных энергетических систем, повышение их эффективности, а также на изучение устойчивости данных систем к воздействию экстремальных внешних факторов с целью обеспечения стабильности энергоснабжения, смягчения негативных последствий климатических изменений и создания условий для устойчивого экономического роста. При этом одним из ключевых направлений исследований становится выявление и всесторонний анализ влияния на работу полупроводниковых солнечных элементов агрессивных природно-климатических факторов, среди которых особую значимость приобретают пылевые отложения, высокие температуры, повышенная влажность, а также содержащиеся в атмосфере соли, способные инициировать процессы коррозии и деградации поверхностей фотоэлементов.

В мире параллельно с расширяющимся применением полупроводниковых солнечных панелей активно развиваются комплексные научные исследования, нацеленные на снижение негативного воздействия внешнесредовых факторов на эффективность и надежность их функционирования. Ведущими направлениями данных исследований являются создание самоочищающихся покрытий различного типа (гидрофобных, гидрофильных, антистатических), позволяющих предотвращать ухудшение оптических характеристик поверхности в результате накопления пыли, а также разработка новых поколений материалов и конструктивных решений солнечных панелей, обладающих повышенной устойчивостью к экстремальным климатическим условиям, включая высокие температуры и избыточную влажность. Особую актуальность в данном контексте приобретают исследования, связанные с оценкой влияния высоких температур воздуха и химически активных компонентов окружающей среды, в частности солей и различных примесей, на характеристики солнечных элементов в экологически неблагоприятных и климатически экстремальных зонах, таких как Приаралье, где агрессивные условия среды приводят к коррозии поверхностей и существенному снижению их оптических и электрических параметров.

В нашей Республике в целях укрепления энергетической независимости, модернизации отраслей экономики и перехода к принципам «зелёной экономики» реализуется комплекс масштабных реформ, направленных на ускоренное внедрение возобновляемых источников энергии и повышение энергоэффективности. В Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026

годы, в частности, поставлена задача доведения доли возобновляемых источников в общей структуре мощностей по производству электроэнергии до 25 процентов, что предполагает широкое внедрение инновационных технологий и развитие научных исследований, обеспечивающих долговременную эксплуатационную эффективность солнечных элементов в сложных экологических условиях. В связи с этим особую важность приобретает научное обоснование и разработка практических решений по обеспечению долгосрочной стабильности работы кремниевых солнечных элементов в условиях Приаралья, характеризующихся высокими температурами, интенсивными пыльными бурями и присутствием агрессивных пылевых частиц, содержащих соли и химические соединения, способные вызывать деградацию фотоэлементов. Научная актуальность данной задачи заключается в необходимости предотвращения процессов деградации солнечных элементов, создания эффективных защитных методов и обеспечения устойчивости их эксплуатационных характеристик в течение продолжительного времени.

Научные результаты, полученные в рамках настоящего исследования, в определённой степени будут способствовать реализации задач, обозначенных в Законе Республики Узбекистан «Об использовании энергетических ресурсов» от 22 мая 2019 года № ЗРУ-539, в Указе Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 года № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», в Указе Президента от 8 октября 2019 года № УП-5847 «Об утверждении Концепции развития системы высшего образования Республики Узбекистан до 2030 года», а также в Постановлении Президента от 20 апреля 2017 года № ПП-2909 «О мерах по дальнейшему развитию системы высшего образования», Постановлении от 19 марта 2021 года № ПП-5032 «О мерах по повышению качества образования в области физики и развитию научных исследований», Постановлении от 17 февраля 2023 года № ПП-57 «О мерах по ускорению внедрения возобновляемых источников энергии и энергосберегающих технологий в 2023 году» и в других нормативно-правовых актах, регламентирующих стратегические направления развития энергетической и образовательной сферы страны.

Соответствие исследования с основными приоритетными направлениям развития науки и технологий в республике. Данная диссертационная работа выполнена в рамках III и IV приоритетных направлений развития науки и технологий Республики Узбекистан: «Энергетика, энергосбережение, транспорт, машиностроение и приборостроение, современная электроника, микроэлектроника, фотоника и развитие электронной приборостроительной отрасли» и «Разработка методов использования возобновляемых источников энергии, создание новых технологий и устройств на основе нанотехнологий, фотоники и других современных технологий».

Степень изученности проблемы. В мире интенсивно развиваются научные исследования, направленные на изучение влияния внешних факторов на эффективность солнечных фотоэлектрических станций и снижение их негативных последствий. Среди зарубежных учёных следует отметить китайского исследователя Синцай Ли (Xingcai Li) и его коллег, которые на

основе экспериментов в аэродинамической трубе проанализировали зависимость накопления пыли от угла наклона панели и расстояния установки. Румынский учёный Кармен Отиля Русэнеску (Carmen Otilia Rusănescu) в своих работах рассмотрела взаимосвязь плотности пыли с такими факторами, как влажность и скорость ветра, и установила, что в зависимости от состава пыли снижение эффективности может составлять от 7 % до 98 %. Бразильская исследовательница Алессандра Комерио (Alessandra Comerio) выполнила количественную оценку экономических потерь, вызванных пылевыми отложениями, а в рамках немецкого проекта LUCA учёные Кристиан Опп (Christian Opp) и Михаэль Гролл (Michael Groll) проводили исследования аэрозольных пылевых осадков в Приаралье с использованием прямого наземного мониторинга.

В Узбекистане исследования в данной области также активно развиваются. Так, Р. Авезова и А. Миролимов оценили общее влияние пыли на эффективность солнечных панелей в условиях страны. В работах А. Миролимова и Х. Ильиева проведено исследование воздействия пыли на фотоэлектрические модули мощностью 330 Вт в условиях Ташкента, и было выявлено, что при отсутствии очистки панелей потери мощности достигают 25,4 %. Учёный У.О. Одамов изучил процессы деградации поликристаллических кремниевых панелей в условиях долгосрочной эксплуатации в климате Узбекистана, в частности пожелтение EVA-плёнки. Кроме того, в совместных исследованиях узбекских и зарубежных учёных установлено, что пылевые бури, возникающие в результате усыхания Аральского моря, оказывают серьёзное влияние на эффективность панелей, увеличивая скорость пыленакопления до 260 мг/м² в сутки.

В то же время проведённый анализ показывает, что, несмотря на наличие данных о составе региональной пыли и её общем негативном воздействии на фотоэлектрические системы, комплексные исследования, направленные на количественную оценку специфических физико-химических свойств пыли, оседающей именно в условиях Приаралья, её влияния на оптические и тепловые параметры современных солнечных панелей, а также на выявление годовой динамики и долгосрочных механизмов деградации под воздействием данного фактора, до настоящего времени в достаточной мере не проводились.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация.

В рамках диссертационной работы были реализованы драйверные проекты: узбекско-индийский проект UZB-IND-2021-88 «Исследование наноструктурированных гидрофобных и супергидрофобных материалов для солнечных элементов», а также проект, финансируемый на основании постановления №ПП-307, «Разработка компьютерно управляемого оборудования для комплексного изучения воздействия различных внешних факторов на солнечные панели».

Целью исследования является определение количества пыли, оседающей на поверхность кремниевых солнечных панелей на примере Приаральского региона, исследование их химического состава, ведение годовой статистики

накопления пыли, изучение влияния оседания пыли, температуры и освещённости на установленные солнечные панели, анализ влияния этих факторов на эффективность солнечных панелей, а также создание установки, позволяющей в лабораторных условиях исследовать воздействие факторов окружающей среды на полупроводниковые солнечные панели.

Задачи исследования:

Наблюдение за скоростью и количеством осаждения пыли на поверхность солнечных панелей в течение года по сезонам (в двух регионах);

Изучение морфологии, химического состава и физических свойств накопленной пыли;

Проведение теоретических и прикладных исследований влияния температуры на кремниевые солнечные панели с учётом климатических условий указанных регионов;

Наблюдение эффектов нагрева, возникающих в результате накопления пыли на поверхности солнечных панелей;

Изучение воздействия факторов окружающей среды на полупроводниковые солнечные панели с использованием программного обеспечения SCAPS-1D;

Разработка устройства, позволяющего исследовать влияние пыли на солнечные панели в лабораторных условиях.

Объектами исследования являются кремниевые солнечные элементы и собранные на их основе солнечные панели.

Предметом исследования являются физико-химические свойства пыли Приаральского региона (состав, морфология, размер), динамика её накопления и влияние на оптические (прозрачность) и электрофизические параметры (V_{oc} , I_{sc} , КПД, тепловое состояние) кремниевых солнечных панелей, воздействие температуры и освещённости на параметры панелей, методология изучения комплексного влияния этих факторов и лабораторная установка для проведения исследований.

Методы исследований: В решении поставленных задач использованы современных аналитических приборов и методик, включающий сканирующий электронный микроскоп (SEM), энергодисперсионная спектроскопия (EDS), рентгеновская дифракция (XRD), рентгенофлуоресцентная спектроскопия (XRF), рН-метр, инфракрасная спектроскопия (IR), рамановский спектрометр, ультрафиолетово-видимая спектроскопия (UV-Vis), вольт-амперные характеристики (ВАХ), симулятор ёмкости солнечного элемента (SCAPS-1D), тепловизор.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

Впервые в условиях Приаралья и Хорезмского региона проведён комплексный анализ физико-химических свойств пыли, накапливающейся на поверхности солнечных панелей (минералогический состав, морфология и размер частиц). Установлено, что в составе пыли преобладают кварц (SiO_2), кальцит (CaCO_3) и гематит (Fe_2O_3), а остроугольная и неровная морфология частиц является основной причиной образования микрповреждений поверхности панелей и возникновения «горячих точек» (hot-spot);

Впервые количественно определена сезонная динамика накопления региональной пыли: в открытых районах (Гурлан) плотность пыли достигает 600–1200 мг/м², тогда как в городских условиях (Нукус) — 80–1000 мг/м². Экспериментально подтверждено, что подобное естественное загрязнение приводит к снижению прозрачности панели до ~20%;

Впервые для Приаральского региона выполнен корреляционный анализ сезонной динамики накопления пыли с различными климатическими факторами (температура, влажность, осадки). Доказано, что наибольшая масса пыли накапливается в сухие и жаркие летне-осенние месяцы, что научно обосновывает необходимость усиления профилактических очистительных работ именно в этот период;

Зависимость параметров полупроводниковых солнечных элементов от температуры, освещённости и концентрации дефектов смоделирована в программе SCAPS-1D. Теоретические расчёты показали, что увеличение концентрации дефектов от 10¹⁰ см⁻³ до 10¹⁵ см⁻³ приводит к снижению коэффициента полезного действия элемента с 18% до 9%, то есть вдвое, и эти результаты с высокой точностью совпадают с лабораторными экспериментами;

Разработано устройство, позволяющее в лабораторных условиях одновременно контролировать специфические климатические и пылевые факторы региона (температура, освещённость, количество пыли, скорость ветра) и исследовать их комплексное воздействие на кремниевые солнечные панели. Данное устройство открывает новые экспериментальные возможности для изучения синергетического влияния внешних факторов на деградацию панелей и испытания защитных покрытий.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

Получен патент на полезную модель № FAP 02337 «Устройство для комплексного измерения электрофизических и фотоэлектрических параметров солнечной панели»;

Обосновано влияние внешней среды и снижение эффективности кремниевых солнечных панелей в Приаральских регионах;

В разработанном устройстве, позволяющем изучать воздействие внешних факторов на солнечные панели в лабораторных условиях, обосновано изменение коэффициента полезного действия при воздействии различного количества пыли, температуры и освещённости.

Достоверность результатов исследований подтверждается: использованием высокоточных и широко применяемых в мировой практике электро- и фоточувствительных приборов, таких как ИК- и Раман-спектрометры, сканирующий электронный микроскоп (SEM), рН-метр, рентгеновская дифракция (XRD), аналитические весы, рентгенофлуоресцентная спектроскопия (XRF), энергодисперсионная спектроскопия (EDS), ультрафиолетово-видимая спектроскопия (UV-Vis), люксметр, тепловизор, а также программное обеспечение SCAPS-1D, что подтверждает надёжность и воспроизводимость проведённых экспериментов.

Научная и практическая значимость диссертации. Научная значимость результатов исследования объясняется тем, что впервые комплексно изучены

физико-химические свойства пыли, характерной для Приаральского региона — её гранулометрический состав, морфология, минералогия и механизмы воздействия на эффективность кремниевых солнечных панелей; подтверждены экспериментальными данными теоретические результаты моделирования влияния температуры и освещённости на параметры панелей с использованием программы SCAPS-1D; а также разработано устройство, позволяющее воспроизводить сложные климатические условия региона в лабораторных условиях.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что разработаны научно обоснованные рекомендации для проектирования и эффективной эксплуатации солнечных электростанций в Приаральском регионе; в частности, создана возможность снижения эксплуатационных затрат и минимизации энергетических потерь за счёт определения оптимальной периодичности очистки поверхности панелей; сформирована база данных, необходимая для создания защитных покрытий, адаптированных к условиям региона; а также обеспечена возможность испытания новых фотоэлектрических модулей в условиях, максимально приближённых к реальным, с использованием разработанного лабораторного устройства.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных научно-практических результатов по изучению влияния внешних факторов на кремниевые солнечные элементы в Приаральском регионе:

Количественные результаты и выявленные закономерности по экспериментальному исследованию и моделированию с помощью программы SCAPS-1D влияния температуры и интенсивности освещённости на электрофизические параметры кремниевых солнечных элементов, а также результаты моделирования, оценивающие влияние дефектов различной концентрации на эффективность элементов и время жизни носителей заряда, были использованы при выполнении фундаментального государственного проекта F2-21 «Влияние температуры, деформации и освещения на параметры наноразмерных полупроводников в сильном электромагнитном поле», рассчитанного на 2017–2020 годы и выполнявшегося на кафедре «Физика» Наманганского инженерно-строительного института (справка Наманганского государственного технического университета от 1 мая 2025 года № 01/10-09/305). Полученные научные результаты позволили рассчитать и оценить влияние температуры и освещённости на параметры наноразмерных полупроводников;

Практические и теоретические результаты, касающиеся особенностей работы кремниевых солнечных элементов в условиях резко континентального климата, были использованы в грантовом проекте CMRG2023BCH10069 «Hybrid Silicon Nanostructures for Multipurpose Application», выполняемом на кафедре материаловедения Университета Мадурай Камарадж (Индия) (справка Madurai Kamaraj University). Полученные теоретические и практические результаты

обеспечили возможность изучения эффективности и характеристик кремниевых солнечных элементов в условиях резко континентального климата;

На основе научных результатов, полученных в рамках диссертационной работы, в журналах, входящих в базы данных Scopus и Web of Science и имеющих импакт-фактор выше 0,5, опубликованы статьи, на которые сделано 11 ссылок. Это подтверждает признание научных результатов научным сообществом и их значимость как основы для последующих исследований.

Апробация научных исследований. Результаты диссертационной работы были обсуждены на 9 международных и 7 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследований. По теме диссертации опубликовано всего 19 научных работ, из них 3 статьи — в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций, в том числе 1 статья — в журнале, индексируемом в международной базе данных Scopus и зарегистрированном как республиканский, и 2 статьи — в зарубежных журналах, индексируемых в базе данных Scopus. Получены свидетельство на 1 программный продукт, предназначенный для использования в электронно-вычислительных машинах, и патент на 1 полезную модель, выданные Агентством интеллектуальной собственности.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав, общих выводов, списка использованных источников и приложений. Общий объём диссертации составляет 122 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, описана степень изученности проблемы, приводится связь исследований с приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, приводится научная новизна, научная и практическая значимость полученных результатов, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

Раздел I диссертации, озаглавленный «Анализ литературы», посвящён краткому обзору и анализу научных источников. В нём подробно рассмотрены принципы работы кремниевых солнечных элементов и панелей, а также основные внешние физические факторы, влияющие на их эффективность — в частности, температура, интенсивность и спектр освещённости, влажность и механизмы воздействия атмосферной пыли. Анализ основан на последних исследованиях, представленных в мировой научной литературе.

В главе также отдельно рассмотрены особенности резко континентального климата Приаральского региона, потенциальные источники атмосферной пыли в этом регионе (включая Оролкум), а также возникающие в связи с этим проблемы для фотогальванических систем. Оценивается степень изученности физико-химических свойств региональной пыли и её количественного влияния

на параметры солнечных панелей в существующих научных трудах. На основе этого выявлены существующие пробелы и актуальные научные задачи, требующие решения в данном направлении.

В конце главы приведены выводы, сделанные по результатам анализа литературы, а также цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе диссертации под названием **«Методы исследования влияния пыли и окружающей среды на полупроводниковые солнечные панели»** изложены методы оценки изменений электрических параметров и эффективности полупроводниковых солнечных панелей, возникающих в результате накопления пыли на их поверхности, а также результаты исследований морфологии, размеров частиц, химического и элементного состава накопленной пыли с использованием методов SEM, Mastersize, Zetasizer, EDX, XRD, Раман- и ИК-спектроскопии.

Кроме того, в главе подробно освещены процессы моделирования воздействия температуры и освещённости на солнечные панели в программе SCAPS-1D и сопоставления полученных результатов с экспериментальными данными. Также представлены методы выявления дефектов на поверхности солнечных панелей с помощью термофотографического анализа (инфракрасной съёмки) и изложены принципы разработки оборудования для лабораторного исследования воздействия факторов окружающей среды на кремниевые солнечные панели, а также методология его применения.

В третьей главе диссертации под названием **«Анализ состава пыли, накопленной на поверхности полупроводниковых солнечных панелей на Приаралья и Хорезмской области»** проведён углублённый анализ количества, морфологии, размеров частиц и химического состава пыли, накопленной на поверхности полупроводниковых солнечных панелей. Также на основе практических экспериментов исследовано влияние пыли на прозрачность поверхности панелей и их электрические параметры.

С целью изучения степени накопления пыли на поверхности кремниевых солнечных панелей были установлены стеклянные панели в двух точках Приаральского региона: в Гурланском районе (Хорезмская область) и в городе Нукус (Республика Каракалпакстан). Результаты накопления пыли представлены на графике (рисунок 1). Анализ показал, что на панели, установленной на открытом участке в сельской местности Гурланского района, на единицу площади (1 м^2) накопилось от 160 до 1200 мг пыли, тогда как на панели, размещённой во дворе в городе Нукус, — от 80 до 1000 мг/м².

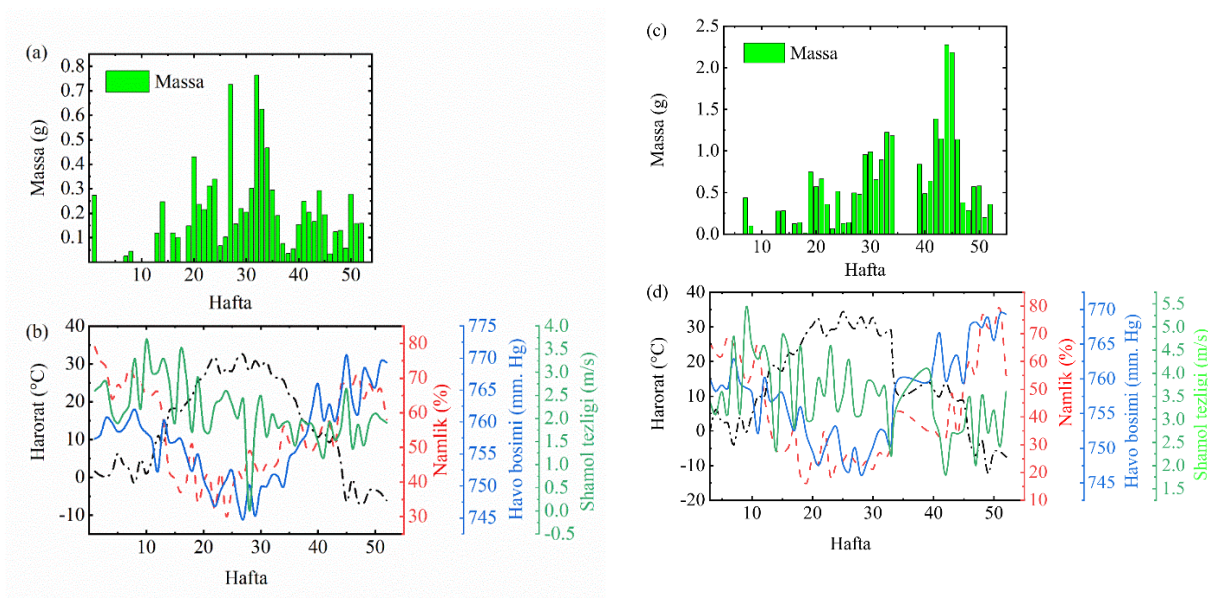


Рисунок 1. Масса пыли, собранной на поверхности стеклянной панели размером $0,5 \times 0,5 \text{ м}^2$, расположенной (а) в отдалённом районе Хорезма и (с) в городе Нукус (Республика Каракалпакстан). Сбор пыли проводился еженедельно, начиная с 9 января 2020 года. На оси абсцисс указаны номера недель. На графиках (b) и (d) представлены температурные, влажностные, барометрические данные и скорости ветра для каждого региона.

На основе анализа полученных результатов было установлено, что количество пыли, оседающей на поверхности стеклянной панели, имеет высокую степень корреляции со средненедельной температурой. Наблюдалось, что в недели с более высокой средней температурой количество накапливаемой пыли также было выше. Это означает, что в недели с высокой температурой эффективность солнечной панели снижается под воздействием сразу двух факторов: как самой температуры, так и накопления пыли.

Согласно результатам анализа массы собранной пыли в разрезе регионов, было установлено, что наибольшее количество пыли накапливается в летний и осенний сезоны по сравнению с зимой и весной.

Морфология собранных образцов пыли была исследована с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), и было установлено, что частицы пыли не имеют чёткой геометрической формы и являются шероховатыми.

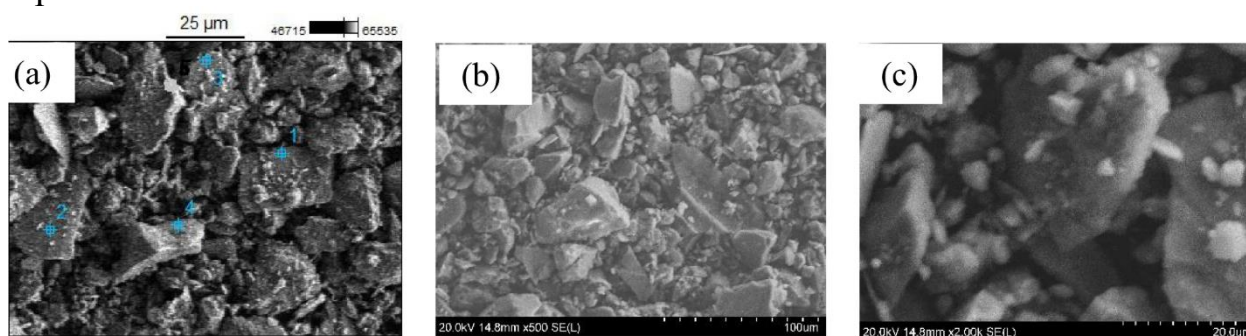


Рисунок 2. SEM-изображения частиц пыли, полученные при различных увеличениях.

Наличие большого количества частиц нестандартной формы в составе пыли указывает на слабое взаимодействие между ними, что способствует их неэффективному сцеплению и перемещению на большие расстояния под действием ветра.

Размеры пылевых частиц были исследованы с помощью приборов Mastersize и Zetasizer. В результате наблюдений было установлено, что максимальные размеры частиц составляют около ~ 10 мкм, а минимальные — несколько нанометров. Также была зафиксирована кинетика изменения распределения размеров частиц, растворённых в деионизированной воде, через 0, 90 и 150 минут. Анализ показал, что с течением времени происходит изменение графика распределения размеров частиц, при этом значение пика распределения сместилось. Смещение пика объясняется растворением некоторых солей, входящих в состав пыли. Это было подтверждено изменением уровня pH раствора через 0, 90 и 150 минут. Данное явление связано с тем, что соединения CO_2 , CaO , MgO , Na_2O и P_2O_5 во взаимодействии с водой изменяют кислотность дисперсии. Остальные соединения, в частности SiO_2 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 , при комнатной температуре с водой в реакцию не вступают.

Результаты EDS-анализа показали, что в составе собранной пыли в наибольшем количестве присутствуют кислород (O), кремний (Si), кальций (Ca) и алюминий (Al). Также были выявлены в меньших количествах калий (K), железо (Fe), магний (Mg), натрий (Na), титан (Ti), хлор (Cl), фосфор (P) и сера (S). Состав пыли был исследован с помощью рентгенофлуоресцентной спектроскопии (XRF) и рентгеновской дифракционной спектроскопии (XRD).

Анализ с использованием XRF показал наличие значительного количества кварца (SiO_2), CO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO и Na_2O . Кроме того, в небольших количествах были зафиксированы элементы Zr, V, Co, Cr и Cu. Результаты XRD подтвердили, что основные пики пылевых частиц соответствуют кварцу (SiO_2).

В ИК-спектрах пыли наблюдались характерные пики колебаний растяжения ($900\text{--}1100\text{ см}^{-1}$) и изгиба ($400\text{--}800\text{ см}^{-1}$) связей Si–O. В частности, поглощение на 800 см^{-1} соответствует симметричным растяжениям Si–O–Si, а на 694 см^{-1} — симметричным изгибам Si–O. В спектре Рамана пики при ~ 205 и 465 см^{-1} также соответствуют α -кварцу, что подтверждает, что основную массу пылевых частиц составляет кварц.

Покрытие поверхности солнечной панели пылью снижает поглощение света и увеличивает сопротивление солнечных элементов, покрытых пылью. В результате прохождения тока они выделяют больше тепла, что приводит к образованию так называемых «горячих точек» (hot spots).

Для выявления нагретых кремниевых солнечных элементов применялся метод инфракрасной (термофотографической) съёмки. В рамках данного исследования в Ургенчском государственном университете был собран кремниевый солнечный модуль из 24 последовательно соединённых монокристаллических кремниевых элементов (156×156 мм) фирмы Talesun. Начальный коэффициент полезного действия собранного солнечного модуля составил около $\sim 8\%$, что объясняется лабораторными условиями сборки и отсутствием современного сварочного оборудования. Один из элементов

собранный солнечной панели был полностью покрыт пылью, и его тепловое изображение было зафиксировано. Термальные снимки чётко показали значительный нагрев элемента, покрытого пылью, поскольку пылевой слой ограничивает световое излучение, повышает сопротивление элемента и вызывает его нагрев за счёт прохождения тока.

Кроме того, с увеличением количества пыли на поверхности солнечной панели наблюдалось линейное снижение тока короткого замыкания (I_{sc}), напряжения холостого хода (V_{oc}) и общей эффективности.

С целью изучения влияния пыли на прозрачность стеклянной панели в Каракалпакстане и Хорезме были установлены стеклянные образцы размером 2.5×7.5 см². Несмотря на то, что спектральная пропускная способность стандартных PV-модулей составляет 92%, в условиях сухой погоды из-за пылевых бурь и загрязнения она может снижаться более чем на 30%. В течение двух месяцев накопление пыли уменьшило прозрачность поверхности стеклянной панели до 20%, однако во время осадков прозрачность улучшалась на 10%.

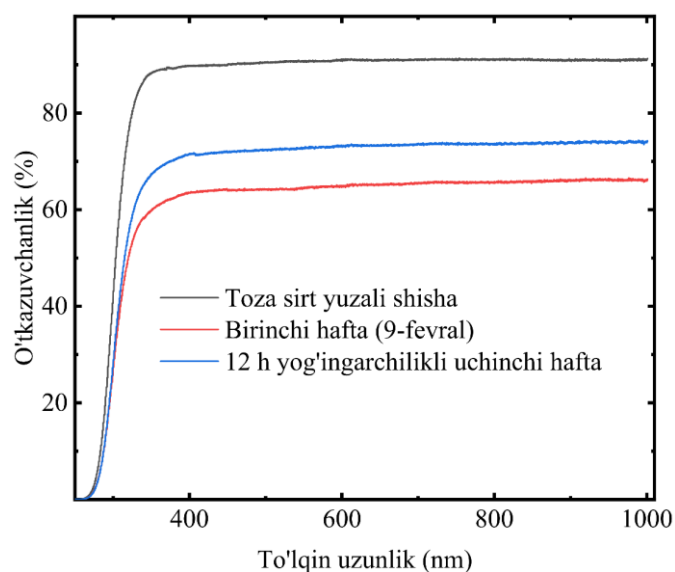


Рисунок 3. Светопропускание стеклянных образцов: (-) с чистой поверхностью, (-) оставленных на одну неделю в сухих атмосферных условиях, и (-) оставленных на две недели, при этом в течение 12 часов наблюдались осадки.

Учитывая большое количество пылевых частиц в субмикронных размерах, текстурированные стеклянные поверхности солнечных панелей с микрометровыми неровностями могут способствовать усиленному оседанию пыли. Это подчеркивает важность правильного выбора размеров текстуры стекла и методов его очистки.

Четвёртая глава под названием «**Методы исследования воздействия окружающей среды на полупроводниковые солнечные панели**» посвящена не только изучению влияния пыли, собранной в Приаральском регионе, на оптические и тепловые свойства солнечных панелей, но также выявлению прямого и количественного воздействия пыли и других характерных для региона

факторов окружающей среды — температуры и освещённости — на фундаментальные электрофизические параметры полупроводниковых солнечных элементов и панелей (напряжение холостого хода — V_{oc} , ток короткого замыкания — I_{sc} , коэффициент полезного действия — КПД).

В качестве одной из исследовательских задач изучалась зависимость эффективности солнечных панелей от температуры в условиях Приаралья. Это было реализовано с помощью устройства, позволяющего моделировать воздействие внешних факторов на солнечные панели в лабораторных условиях. Исследования проводились в диапазоне интенсивностей освещения 0–100 мВт/см² и температур 22–50 °С. На рисунке 4 приведены результаты изменения тока короткого замыкания (I_{sc}) и напряжения холостого хода (V_{oc}) в зависимости от температуры.

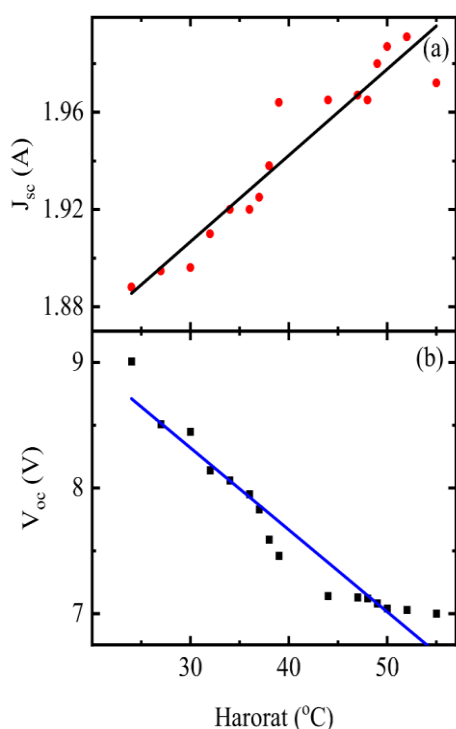


Рисунок 4. Зависимость тока короткого замыкания (а) и напряжения холостого хода (б) от температуры.

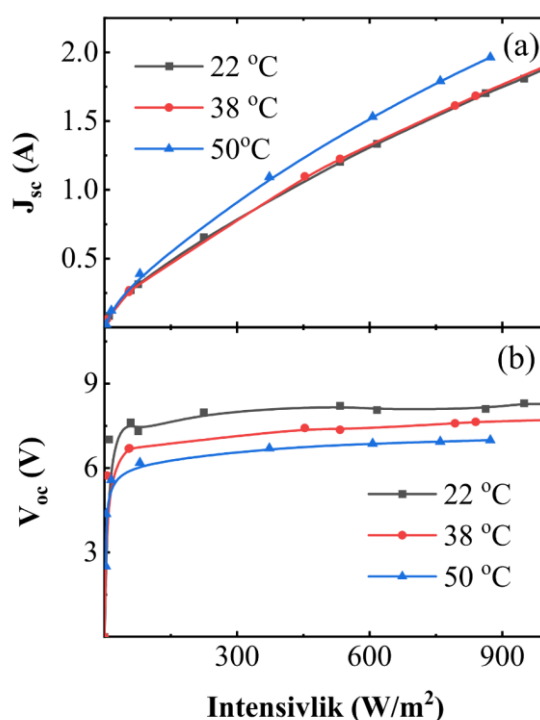


Рисунок 5. Зависимость тока короткого замыкания (а) и напряжения холостого хода (б) от уровня освещённости.

Анализ показал, что с повышением температуры ток короткого замыкания (I_{sc}) незначительно увеличивается, тогда как напряжение холостого хода (V_{oc}) линейно снижается. Хотя изменение тока короткого замыкания невелико, напряжение холостого хода в интервале температур 0–50 °С уменьшается примерно на 20%, что считается значительным изменением.

На рисунке 5 представлена зависимость тока короткого замыкания и напряжения холостого хода от интенсивности освещения при различных температурах ($T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T = 38\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$). Согласно результатам анализа, с увеличением освещённости ток короткого замыкания I_{SC} возрастает линейно, в то время как рост напряжения холостого хода V_{OC} носит сублинейный характер. Как и ожидалось, I_{SC} и V_{OC} значительно зависят от уровня освещённости (I_0).

С целью изучения влияния дефектов в составе элементов на эффективность кремниевых солнечных панелей, в программной среде SCAPS-1D была проведена модельная оценка изменения эффективности солнечных панелей при различной концентрации дефектов.

С увеличением концентрации дефектов в структуре полупроводника наблюдалось сокращение времени жизни носителей заряда.

На рисунке 6 приведены вольт-амперные характеристики солнечных элементов при различных концентрациях дефектов в полупроводниковой структуре. При этом плотность дефектов варьировалась от 10^{10} см^{-3} до 10^{15} см^{-3} с увеличением более чем в 10 раз.

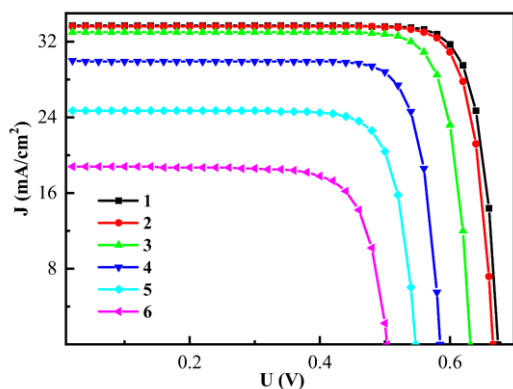


Рисунок 6. Вольт-амперная характеристика кремниевого солнечного элемента при различных концентрациях дефектов.

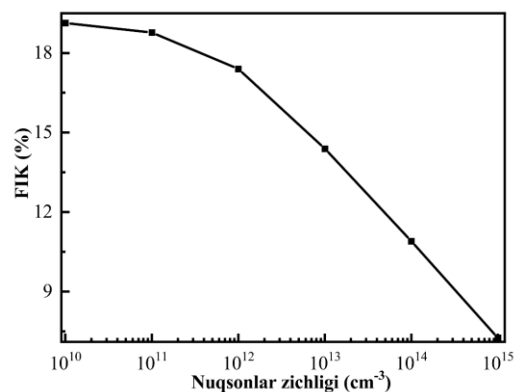


Рисунок 7. Изменение коэффициента полезного действия кремниевого солнечного элемента при различных концентрациях дефектов.

Это подтверждается результатами, представленными на рисунке 7, где показано снижение коэффициента полезного действия (КПД) кремниевого солнечного элемента при различных концентрациях дефектов. На рисунках 8 (a) и (b) приведены зависимости ток-напряжение, полученные методом моделирования в программе SCAPS-1D при различных температурах и уровнях освещённости. Как видно, при повышении температуры в диапазоне $22\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается незначительное увеличение тока короткого замыкания I_{SC} (рисунки 8 (a) и (c)) и значительное снижение напряжения холостого хода V_{OC} (рисунки 8 (a) и (c)), что соответствует результатам, полученным в эксперименте (рисунки 8 (a) и (b)). В теоретическом моделировании предполагается, что время жизни носителей заряда и длина их диффузии не зависят от температуры, из чего следует, что ток короткого замыкания I_{SC} и насыщенный ток I_0 также не зависят от температуры. Соответственно, согласно уравнению (2), напряжение

холостого хода V_{oc} должно линейно изменяться с ростом температуры (рисунок 8 (e)). Также видно, что при увеличении уровня освещённости I_0 ток короткого замыкания I_{sc} резко возрастает [рисунки 8 (b) и (d)], тогда как напряжение холостого хода V_{oc} слабо зависит от I_0 (рисунки 8 (b) и (f)).

$$J_{sc} \approx J_{ph}(T) = \frac{G}{G_{ref}} [J_{ph,ref} + \mu_{J_{sc}}(T - T_{ref})] \quad (1)$$

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{J_{sc}}{J_0} \right) \quad (2)$$

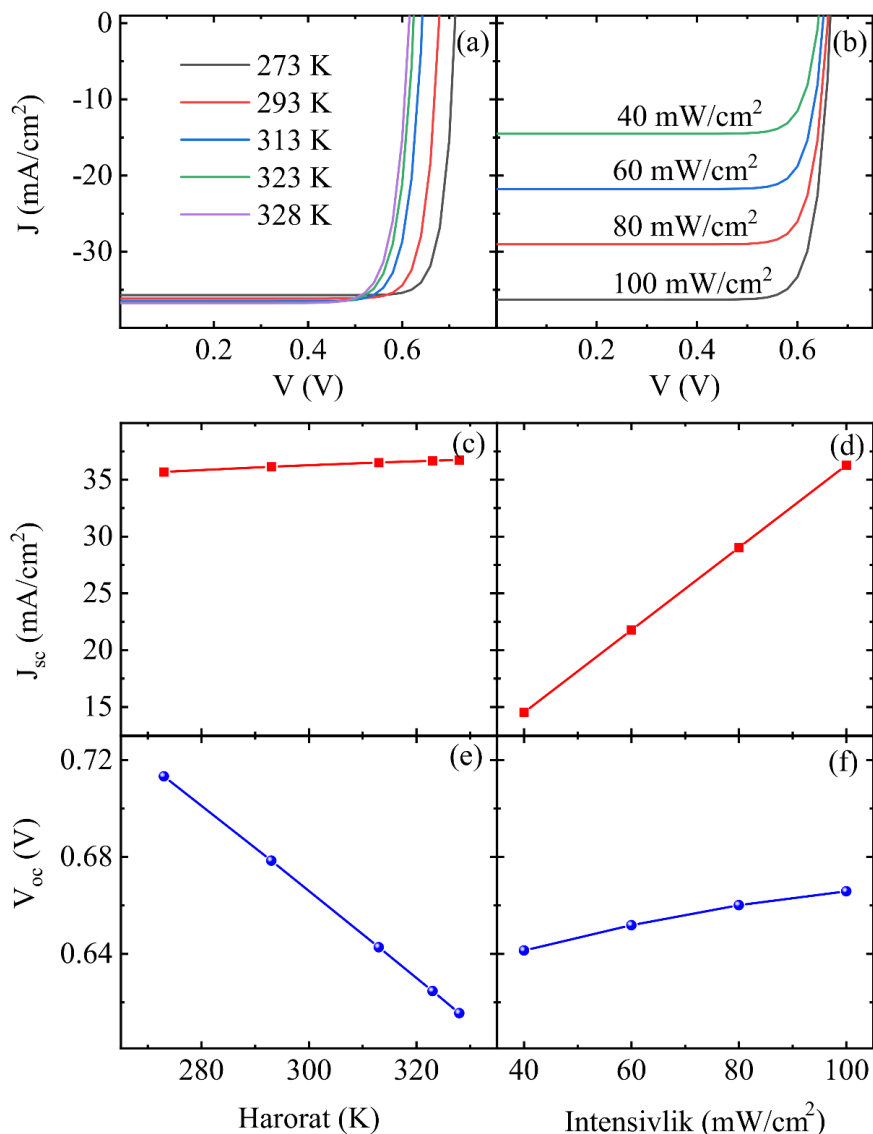


Рисунок 8. Зависимости ток-напряжения, тока короткого замыкания и напряжения холостого хода от температуры и освещённости, полученные в результате моделирования в программе SCAPS-1D.

На рисунке 9 приведён график измеренных значений тока короткого замыкания для солнечных панелей с чистой поверхностью и покрытых пылью. Из графика видно, что с увеличением освещённости разница между токами короткого замыкания чистой и загрязнённой панелей возрастает. При низкой

освещённости эта разница очень мала. Это указывает на то, что накопление пыли снижает способность солнечной панели к поглощению света и, как следствие, уменьшает её выходную мощность.

График измеренного напряжения холостого хода для обеих панелей (см. рисунок 10) показывает, что при увеличении интенсивности света разница в значениях напряжения холостого хода между чистой и пыльной панелями остаётся незначительной.

В целом можно сказать, что в результате накопления пыли на поверхности солнечных панелей ток короткого замыкания снижается в большей степени, чем напряжение холостого хода.

Изменения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода солнечной панели в зависимости от слоя пыли на поверхности выражаются следующими формулами:

$$I_{sc}(d, G) = kG(1 - e^{-\alpha d}) \quad (3)$$

$$V_{oc} = V_{oc,ref} + K_V(T - T_{ref}) + \frac{nkT}{q} \left[\ln \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) - \alpha d \right] \quad (4)$$

где G – освещённость, падающая на поверхность панели; k – коэффициент пропорциональности, зависящий от физических свойств панели; d – толщина слоя пыли. Из уравнений (3) и (4) видно, что ток короткого замыкания линейно, а напряжение холостого хода – логарифмически зависят от толщины пылевого слоя.

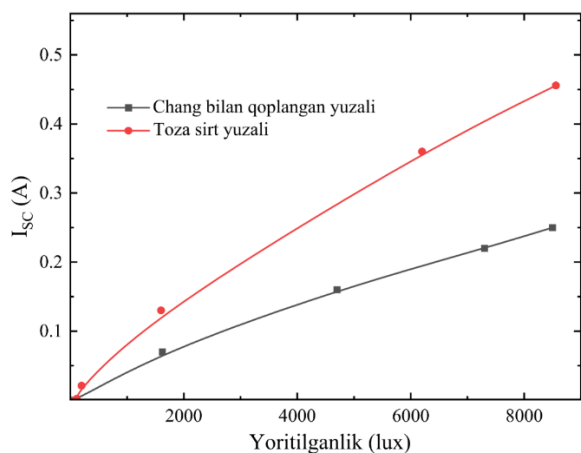


Рисунок 9. График зависимости тока короткого замыкания кремниевой солнечной панели с чистой поверхностью и покрытой пылью от уровня освещённости.

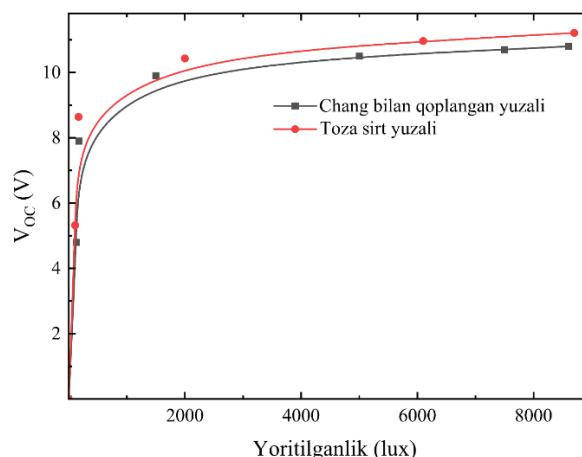


Рисунок 10. График зависимости напряжения холостого хода кремниевой солнечной панели с чистой поверхностью и покрытой пылью от уровня освещённости.

В результате выполнения диссертационной работы была разработана установка, позволяющая изучать влияние факторов окружающей среды на солнечные панели, и на неё получен патент как на полезную модель. Устройство обеспечивает возможность изменения угла падения света, регулирования уровня освещённости в диапазоне от 0 до 1000 Вт/м², измерения скорости ветра, а также позволяет определять скорость осаждения пыли на поверхность солнечной панели под воздействием ветра и исследовать влияние загрязнения поверхности солнечных элементов на их эффективность.

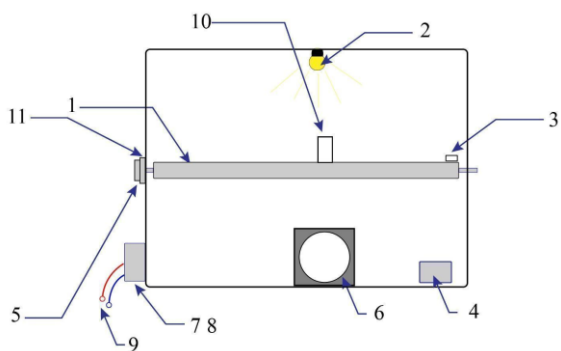


Рисунок 11. Чертёж вида спереди устройства полезной модели.

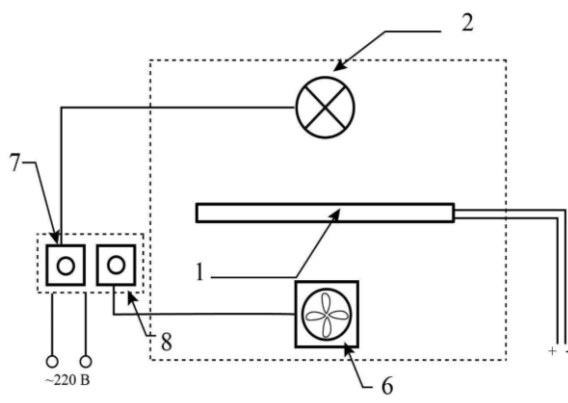


Рисунок 12. Электрическая схема подключения устройства полезной модели.

Корпус устройства изготовлен из закалённого стекла, при этом в центральной части внутреннего пространства корпуса с помощью пяти торсовых механизмов закреплена одна солнечная фотогальваническая панель, с возможностью изменения её угла наклона. Данная установка позволяет изучать влияние внешних факторов на солнечные панели путём варьирования угла наклона панели и уровня освещённости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлены количественные и сезонные закономерности накопления пыли в регионе При Аралья. В результате наблюдений количественно подтверждено, что поверхностная плотность пыли в открытых территориях (Гурлан) составляет 600–1200 мг/м², а в городских условиях (Нукус) — 80–1000 мг/м². Установлено, что максимальный уровень накопления пыли приходится на летний и осенний сезоны, что напрямую связано с высокими температурами и сухим климатом.

2. Обоснованы механизмы влияния морфологии и минералогического состава пылевых частиц на эффективность панелей. Анализ с использованием SEM, XRD и EDX показал, что частицы пыли имеют неровную, остроугольную морфологию и состоят преимущественно из кварца (SiO₂), кальцита (CaCO₃) и гематита (Fe₂O₃). Эти результаты указывают на то, что влияние пыли на панели проявляется через оптические и тепловые потери.

3. Количественно оценено влияние пылевого слоя на оптическую прозрачность. Установлено, что за два месяца естественного загрязнения интегральная оптическая прозрачность стекла панели снижается до ~20% по сравнению с чистым состоянием. После осадков наблюдается частичное восстановление прозрачности (~10%). Показано, что снижение прозрачности уменьшает поток фотонов, попадающих на полупроводник, что является основной физической причиной падения тока короткого замыкания.

4. Экспериментально подтверждено возникновение эффекта "горячей точки" (Hot-spot). Установлено, что неравномерное запыление приводит к затенению отдельных полупроводниковых солнечных элементов, что вызывает их работу в режиме обратной нагрузки, приводящей к локальному перегреву за счёт тепла Джоуля. Это явление, подтверждённое термографическим анализом, признано одним из ключевых механизмов долгосрочной деградации панелей.

5. Изучено влияние температуры и освещённости на основные электрофизические параметры кремниевого солнечного элемента. Эксперименты и моделирование с использованием SCAPS-1D показали, что повышение температуры с 22°C до 50°C приводит к линейному снижению напряжения холостого хода (V_{oc}), а увеличение освещённости в пределах 0–200 Вт/м² вызывает почти линейный рост тока короткого замыкания (I_{sc}) и логарифмический рост V_{oc} . Эти результаты полностью соответствуют фундаментальным законам физики полупроводников.

6. Количественно смоделировано влияние концентрации дефектов в полупроводнике на эффективность панели. С помощью программы SCAPS-1D показано, что увеличение концентрации дефектов с 10¹⁰ см⁻³ до 10¹⁵ см⁻³ резко сокращает время жизни носителей заряда (τ). Это, в свою очередь, усиливает рекомбинацию по механизму Шокли-Рида-Холла (SRH) и снижает КПД солнечного элемента с 18% до 9%, то есть в два раза.

7. Создана новая лабораторная установка и подтверждена её эффективность. Разработана оригинальная лабораторная установка, позволяющая изучать комплексное воздействие внешних факторов (пыли, температуры, освещённости, ветра) на полупроводниковые солнечные панели в

контролируемых условиях. На эту установку получен патент полезной модели № FAP 02337 Агентства интеллектуальной собственности Республики Узбекистан. С её помощью возможно лабораторное исследование влияния различных уровней освещённости, температуры, влажности и запыленности на полупроводниковые солнечные панели.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING OF SCIENTIFIC
DEGREES PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 URGENCH
STATE UNIVERSITY NAMED AFTER ABU RAYHAN BIRUN**

URGENCH STATE UNIVERSITY NAMEDAFTER ABU RAYHAN BIRUNI

BAZARBAEV RUSTAM BAKHRAMBAYEVICH

**STUDY OF THE INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS ON SILICON
SOLAR CELLS IN THE PRE-ARAL SEA REGION**

01.04.10- Physics of semiconductors

ABSTRACT

**of dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and
mathematical sciences**

Urgench – 2025

The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of Republic of Uzbekistan under number B.2025.1.PhD/FM1272.

Dissertation has been prepared Urgench State University named after Abu Rayhan Biruni.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the scientific council website (www.urdu.uz) and on the website of "Ziyonet" Information and educational portal (www.ziyonet.uz).

Research supervisors: **Yakubov Komiljon Ruzmetovich**
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor

Research advisor: **Karazhanov Smagul Zhanabergenovich**
Doctore of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Official opponents: **Aliyev Rayimjon**
Doctor of Technical Sciences, Professor

Muratov Abat Seypullaevich
Doctor of Philosophy (PhD) in Physics and Mathematics,
Associate Professor

Leading organization: **Tashkent State Technical University named after Islam Karimov**

The defense will take place on "10" October 2025 at 14:00 at the meeting of scientific council number PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 at the Urgench State University named after Abu Rayhan Beruni. (Address: 220100, Uzbekistan, Urgench, st. Kh. Alimjana, house 14.. Phone: (99862)224-66-11. Fax: (99862) 224-67-00, e-mail: info@urdu.uz).

The doctoral dissertation is possible to review in Information-resource centre at the Urgench State University named after Abu Rayhan Beruni. (is registered № _____). (Address: 220100, Uzbekistan, Urgench, st. Kh. Alimjana, house 14. Phone: (99862)224-66-11. Fax: (99862) 224-67-00. e-mail: arm@urdu.uz

The dissertation abstract was distributed on " _____ " _____ 2025.

(mailing report № _____ on " _____ " _____ 2025).



U.O. Kutliyev
Chairman of Scientific Council on award of scientific degrees, doctor of physical and mathematical sciences, professor

U.P. Asatova
Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, PhD, docent

K.A. Ismaylov
Chairman of scientific seminar under scientific Council on award of scientific degrees, doctor of physical and mathematical sciences, professor

INTRODUCTION (Abstract for dissertation of Doctor of Philosophy (PhD))

The purpose of the study to determine the amount of dust settling on the surface of silicon solar panels using the example of the Aral Sea region, to study its chemical composition, to maintain annual statistics of dust accumulation, to investigate the influence of dust deposition, temperature, and illumination on installed solar panels, to analyze the impact of these factors on the efficiency of solar panels, and to develop an installation that makes it possible to study the effects of environmental factors on semiconductor solar panels under laboratory conditions.

The objects of research work are silicon solar cells and solar panels assembled on their basis.

The scientific novelty of the research work is as follows:

For the first time, in the conditions of the Aral Sea and Khorezm regions, a comprehensive analysis of the physicochemical properties of dust accumulating on the surface of solar panels (mineralogical composition, morphology, and particle size) has been carried out. It has been established that the dust is mainly composed of quartz (SiO_2), calcite (CaCO_3), and hematite (Fe_2O_3), while the angular and irregular particle morphology is the main cause of micro-damages to the panel surface and the occurrence of “hot spots”;

For the first time, the seasonal dynamics of regional dust accumulation have been quantitatively determined: in open areas (Gurlan), dust density reaches 600–1200 mg/m^2 , whereas in urban conditions (Nukus) it is 80–1000 mg/m^2 . It has been experimentally confirmed that such natural contamination leads to a decrease in panel transparency by up to ~20%;

For the first time, a correlation analysis of the seasonal dynamics of dust accumulation with various climatic factors (temperature, humidity, precipitation) has been performed for the Aral Sea region. It has been proven that the largest amount of dust accumulates during dry and hot summer–autumn months, which scientifically justifies the need to intensify preventive cleaning measures precisely during this period;

The dependence of semiconductor solar cell parameters on temperature, illumination, and defect concentration has been modeled using the SCAPS-1D program. Theoretical calculations have shown that an increase in defect concentration from 10^{10} cm^{-3} to 10^{15} cm^{-3} leads to a decrease in cell efficiency from 18% to 9%, i.e., by half, and these results coincide with high accuracy with laboratory experiments;

A device has been developed that allows simultaneous control of the region-specific climatic and dust factors (temperature, illumination, dust amount, wind speed) under laboratory conditions and enables the study of their combined impact on silicon solar panels. This device opens up new experimental opportunities for investigating the synergistic influence of external factors on panel degradation and for testing protective coatings.

Implementation of the research results. based on the scientific and practical results obtained on the study of the influence of external factors on silicon solar cells in the Aral Sea region:

The quantitative results and identified regularities on the experimental study and

modeling by means of the SCAPS-1D program of the influence of temperature and illumination intensity on the electrophysical parameters of silicon solar cells, as well as the modeling results evaluating the effect of defects with different concentrations on the efficiency of the elements and the lifetime of charge carriers, were used in the implementation of the fundamental state project F2-21 “The influence of temperature, deformation and illumination on the parameters of nanoscale semiconductors in a strong electromagnetic field” for 2017–2020, carried out at the Department of Physics of Namangan Engineering-Construction Institute (reference from Namangan State Technical University dated May 1, 2025, No. 01/10-09/305). The obtained scientific results made it possible to calculate and evaluate the influence of temperature and illumination on the parameters of nanoscale semiconductors;

The practical and theoretical results obtained on the properties of silicon solar cells under sharply continental climatic conditions were used in the grant project CMRG2023BCH10069 “Hybrid Silicon Nanostructures for Multipurpose Application”, carried out at the Department of Material Science, Madurai Kamaraj University, India (reference from Madurai Kamaraj University). The obtained theoretical and practical results made it possible to study the efficiency and properties of silicon-based solar cells under sharply continental conditions;

Based on the scientific results obtained within the framework of the dissertation work, articles have been published in journals included in the Scopus and Web of Science databases with an impact factor higher than 0.5, and these works have been cited 11 times. The obtained scientific results have been recognized by the scientific community and serve as a basis for further research.

The structure and scope of the thesis. The dissertation comprises an introduction, three chapters, general conclusions, a list of references, and appendices. The total length of the dissertation is 122 pages.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST of PUBLISHED WORKS

I bo'lim (I часть, part I)

1. R. Bazarbayev, B. Zhou, A. Allaniyazov, . Zeng, D. Mamedov, E. Ivanitskaya, Q. Wei, H. Qian, K. Yakubov, M. Ghali, S. Karazhanov Physical and chemical properties of dust in the Pre-Aral region of Uzbekistan // Environmental Science and Pollution Research, 2022. – Volume.29, pages 40893–40902 (Scopus, IF=8.7, Q1)

2. R.B.Bazarbayev, K.R.Yakubov, D.Sh.Kurbanov, A.I.Allaniyazov, S.Balakumar, A.B.Kamalov, G.Janabergenova, Q.Wei, H.Qian, I.U.Polvonnazirov, S.Zh.Karazhanov Performance of crystalline Si solar cells and module on temperature and illumination intensity // Materials Today: Proceedings, 2022. Volume. 64, Part.5. 1-pp. 661-1665 (Scopus, IF=4.9, Q2)

3. Bazarbayev R., Kurbanov D., Karazhanov S., Yakubov K. The Possibility of the Exploration of Influence of External Factors on the Solar Panels in Laboratory Conditions (2023) Applied Solar Energy (English translation of Geliotekhnika), 59 (2), pp. 164 – 168, DOI: 10.3103/S0003701X22601223 (Scopus, IF=3.0, Q3)

Patentlar (Патенты, Patents)

4. Yakubov K.R., Karajanov S.J., Qurbonov D.Sh., Bazarbayev R.B. “Quyosh panellarining elektrofizik va fotoelektrik poarametrlarini kompleks o'lchash uchun qurilma” Foydali model uchun patent № FAP 02337

II bo'lim (II часть, part II)

5. Yakubov K.R., Karajanov S.J., Qurbonov D.Sh., Bazarbayev R.B. Quyosh panellariga tashqi omillarning ta'sirini kompleks o'rganish // O'zbekiston Respublikasi Intellektual Mulk agentligi rasmiy byulleteni, 2022 № DGU 14243

6. K.R. Yakubov, R.B. Bazarbayev, B. Kamilov Quyosh energiyasidan elektr energiyasi olishning afzalliklari // Fizika fanida iste'dodli yoshlarning o'rni RIAK-XII-2019 Respublika ilmiy anjumani materiallari 18-may 2019, 249-251-betlar.

7. K.R. Yakubov, R.B. Bazarbayev, B. Kamilov Kompyuter yordamida boshqariladigan fotovoltaika qurilmasiyordamida fotoelementlarning parametrlarini aniqlash // Fizika fanida iste'dodli yoshlarning o'rni RIAK-XII-2019 Respublika ilmiy anjumani materiallari 18-may 2019, 249-251-betlar.

8. K.R. Yakubov, R.B. Bazarbayev, S. Karajanov Quyosh paneli xarakteristikalarining tushayotgan yorug'lik intensivligiga bog'liqligini tadqiq qilish // Materials of International conference “The modern problems of renewable energy sources and sustainable environment” Tashkent, September 25-27th, 2019 62-64 pages

9. K.R. Yakubov, R.B. Bazarbayev. *Quyosh elementlari asosidagi panel xarakteristikasiga haroratning ta'sirini o'rganish.* // “The modern problems of renewable energy sources and sustainable environment” xalqaro konferensiya materiallari, 25-27 sentabr 2019, 53-56 betlar.

10. K.R. Yakubov, S.J. Karajanov, R.B. Bazarbayev. *Quyosh paneli xarakteristikalarining tushayotgan yorug'lik intensivligiga bog'liqligini tadqiq*

qilish. // “The modern problems of renewable energy sources and sustainable environment” xalqaro konferensiya materiallari, 25-27 sentabr 2019, 62-64 betlar.

11. K.Yakubov, Bazarbayev R., Zhou B., Allaniyazov A., Zeng G.G., Mamedov D., Ivanitskaya E.A.E., Wei Q., Qian H., Ghali M., Karazhanov S.Zh. *O‘zbekistonning Orolbo‘yi mintaqasidagi changning fizik va kimyoviy xususiyatlarini quyosh panellariga ta’sirini o‘rganish.* // Zamonaviy mikroelektronikaning rivojlanishida fan, ta’lim va innovatsiya integratsiyasi, Andijon, 24-25 dekabr 2020, 264-265 betlar.

12. Yakubov K., Bazarbayev R., O‘razboev J., Bekberganov A., Qodirova R., Yaxshimurodov B., Allaniyazov A., Karazhanov S. *Keskin kontinental iqlim sharoitida kremniyli quyosh panellarining xarakteristikalarini o‘rganish.* // Zamonaviy mikroelektronikaning rivojlanishida fan, ta’lim va innovatsiya integratsiyasi, Andijon, 24-25 dekabr 2020, 335-337 betlar.

13. Yakubov K., Bazarbayev R., Qurbonov D., Karazhanov S. *Quyosh fotovoltaik panellari parametrlariga atrof muhit ta’sirini uskuna yordamida o‘rganish.* // Перспективы инновационного метрологического обеспечения промышленности и его актуальные научно-практические проблемы, Toshkent, 18-19 may 2021, 367-369 betlar.

14. S.Zh. Karazhanov, R. Bazarbayev, B. Zhou, A. Allaniyazov, G.G. Zeng, D. Mamedov, E.A.E. Ivanitskaya, Q. Wei, H. Qian, K. Yakubov, M. Ghali. *Physical and chemical properties of dust in the Pre-Aral region of Uzbekistan and its influence on solar modules.* // EUPVSEC, 6-10 sentabr 2021, pp. 200-203.

15. K. Yakubov, R. Bazarbayev, D. Qurbanov, Q. Wei, H. Qian, S. Karajanov. *The study of the characteristics of crystalline solar cells in the climatic conditions of the pre-Aral Sea region.* // International Workshop “Functional materials for energy applications” (FUNMAT), 15-17 sentabr 2021, p. 35.

16. Bazarbaev R., Yakubov K., Kurbanov D., Karajanov S. *The possibility of the exploration of influences of external factors on the solar panels in laboratory conditions.* // International scientific-technical conference “New horizons of low-carbon development in the world and Uzbekistan”, 23-24 sentabr 2022, p. 109.

17. K.Yakubov, R. Bazarbayev, D. Qurbanov, S. Karajanov. *Quyosh elementlari samaradorligini oshirishda tashqi muhit ta’sirini kamaytiruvchi usullarni qo‘llash.* // Fotoenergetikada nanostrukturali yarimo‘tkazgich materiallar III xalqaro ilmiy anjuman, 24-25 noyabr 2022, 37-38 betlar.

18. I.U.Polvonnazirov, K.R.Yakubov, R.B.Bazarbayev, D.Sh.Qurbanov, S.J.Karajanov. *Zaryad tashuvchilarni turli xil yashash vaqtlarida kremniyli quyosh elementlarining foydali ish koeffitsiyenti.* // “Fotonika muammolari va rivojlanish istiqbollari”, Urganch, 27-28 may 2022, 312-314 betlar.

19. K. Yakubov, R. Bazarbayev, D. Qurbanov, S. Karajanov. *Fotovoltaik panellar yuzasi ifloslanishining darajasini o‘rganish zaruriyati.* // “YARIMO‘TKAZGICHLAR, NANOMATERIALLAR VA FOTOENERGETIKANING DOLZARB MUAMMOLARI”, Urganch, 9-10 dekabr 2022, 168-169 betlar.

20. Rustam Bazarbayev, Komiljon Yakubov, Davron Qurbanov, Smagul Karazhanov. *Dust properties of the Pre-Aral region and their influence on solar panel characteristics.* // ECOLOGY AND RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES

(ERANET-2023) International Workshop and school, Karakalpak State University, Nukus, Karakalpakstan, Uzbekistan, 22-23 noyabr 2023, p. 12.

21. Komiljon Yakubov, Rustam Bazarbayev, Davron Qurbanov, Smagul Karajanov. *Quyosh panellarining elektrofizik va fotoelektrik parametrlarini kompleks o'lchash uchun qurilma. // Functional materials for energy applications (FUNMAT-2)*, Urgench, Uzbekistan, 28 iyun 2024, pp. 39-40.

Dissertatsiya avtoreferati “Khwarezm publication” nashriyotida tahrir qilindi.

Bosishga ruxsat etildi: 22.09.2025-yil.
Bichimi 60x84^{1/16}, “Times New Roman”
garniturada raqamli bosma usulida bosildi.
Shartli bosma tabog‘i 3. Adadi: 100. Buyurtma: № 141
“Khwarezm travel” bosmaxonasida chop etildi
220502, Xorazm, Urganch tumani, Zargarlar mahallasi,
Marvarid ko‘cha 7-yo‘lak 4-uy