

**ATROF-MUHIT VA TABIATNI MUHOFAZA QILISH  
TEXNOLOGIYALARI ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI  
ILMIY DARAJASINI BERUVCHI PhD.18/2025.27.12.T.01.01 RAQAMLI  
ILMIY KENGASH**

---

**ATROF-MUHIT VA TABIATNI MUHOFAZA QILISH  
TEXNOLOGIYALARI ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI**

**XALMURATOV BATIR XALBAY ULI**

**IQLIM O'ZGARISHI SHAROITIDA OROLBO'YI HUDUDIDA  
QUM-CHANG BO'RONLARINING DAVOMIYLIGINI BASHORATLASH**

**11.00.05 – Atrof-muhitni muhofaza qilish va tabiiy resurslardan oqilona foydalanish**

**TEXNIKA FANLARI FALSAFA DOKTORI (PhD)  
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

**Toshkent – 2026**

**Texnika fanlari falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)  
по техническим наукам**

**Contents of dissertation abstract of the of doctor of philosophy (PhD) on  
technical sciences**

**Xalmuratov Batir Xalbay uli**

Iqlim o'zgarishi sharoitida Orolbo'yi hududida qum-chang  
bo'ronlarining davomiyligini bashoratlash.....3

**Халмуратов Батыр Халбаевич**

Прогнозирование продолжительности песчано-пыльных бурь  
в регионе Приаралья в условиях изменения климата.....29

**Khalmuratov Batir Khalbay uli**

Prediction of the duration of dust and sand storms in the Aral Sea region  
under climate change conditions.....59

**E'lon qilingan ishlar ro'yxati**

Список опубликованных работ  
List of published works.....63

**ATROF-MUHIT VA TABIATNI MUHOFAZA QILISH  
TEXNOLOGIYALARI ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI  
ILMIY DARAJASINI BERUVCHI PhD.18/2025.27.12.T.01.01 RAQAMLI  
ILMIY KENGASH**

---

**ATROF-MUHIT VA TABIATNI MUHOFAZA QILISH  
TEXNOLOGIYALARI ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI**

**XALMURATOV BATIR XALBAY ULI**

**IQLIM O'ZGARISHI SHAROITIDA OROLBO'YI HUDUDIDA  
QUM-CHANG BO'RONLARINING DAVOMIYLIGINI BASHORATLASH**

**11.00.05 – Atrof-muhitni muhofaza qilish va tabiiy resurslardan oqilona foydalanish**

**TEXNIKA FANLARI FALSAFA DOKTORI (PhD)  
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

**Toshkent – 2026**

Texnika fanlari falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida № B2025.3.PhD/T414 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Atrof-muhit va tabiatni muhofaza qilish texnologiyalari ilmiy-tadqiqot institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, ingliz, rus (rezyume)) institut veb sahifasi (ecoilm.uz, uznature.uz) va «Ziyonet» axborot ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbar:**

**Pulatov Baxtiyor Alimovich**  
texnika fanlari doktori, professor

**Rasmiy opponentlar:**

**Sharipov Shavkat Muxamajanovich**  
geografiya fanlari doktori, professor

**G'afforov Husen Shirinovich**  
texnika fanlari falsafa doktori, katta ilmiy xodim

**Yetakchi tashkilot:**

O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi  
Qoraqalpog'iston bo'limi Qoraqalpoq tabiiy fanlar ilmiy tadqiqot instituti

Dissertatsiya himoyasi 2026-yil "15" 06 sut 15<sup>00</sup> da Atrof-muhit va tabiatni muhofaza qilish texnologiyalari ilmiy-tadqiqot institutidagi PhD.18/2025.27.12.T.01.01 raqamli Ilmiy kengash yig'ilishida bo'lib o'tadi.

Manzil: 111104, Toshkent viloyati, Toshkent tumani, Darxon qo'rg'oni, Chimkent yo'li ko'chasi, 2-uy. Aloqa ma'lumotlari: tel.: (77) 782-27-17; [eco\\_ilm@umail.uz](mailto:eco_ilm@umail.uz).

Dissertatsiya bilan Markaziy Osiyo atrof-muhit va iqlim o'zgarishini o'rganish universiteti (Green University) huzuridagi Atrof-muhit va tabiatni muhofaza qilish texnologiyalari ilmiy-tadqiqot institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin. Manzil: 111104, Toshkent viloyati, Toshkent tumani, Darxon qo'rg'oni, Chimkent yo'li ko'chasi, 2-uy. Aloqa ma'lumotlari: tel.: (77) 782-27-17; [eco\\_ilm@umail.uz](mailto:eco_ilm@umail.uz).

Dissertatsiya avtoreferati 2026-yil «08» 06 da tarqatildi.

(2026 - yil «08» 06 dagi 26/02 raqamli reyestr bayonnomasi).



**L. N. Samiyev**  
Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash huzuridagi ilmiy kotibi, t.f.d., dotsent.

**O. G. Ergashev**  
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash huzuridagi ilmiy kotibi, t.f.d., k.i.x.

**Sh. O. Muradov**  
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash huzuridagi ilmiy seminar raisi, t.f.d., professor.

## KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati.** Jahonda iqlim o'zgarishi sharoitida ekologik xavflarning kuchayishi, xususan qum-chang bo'ronlarining yuzaga kelishi va davomiyligini ilmiy asosda o'rganish hamda ularni bashoratlash uchun zamonaviy monitoring va modellashtirish usullarini qo'llash yetakchi o'rinlardan birini egallamoqda. Dunyo miqyosida iqlim o'zgarishi natijasida qurg'oqchilikning kuchayishi, suv resurslarining qisqarishi va cho'llanish jarayonlarining jadallashuvi qum-chang bo'ronlarining takrorlanish chastotasi va davomiyligiga bevosita ta'sir ko'rsatayotganini inobatga olsak, Orolbo'yi hududida ushbu jarayonlarni chuqur tahlil qilish va ularning davomiyligini bashoratlash dolzarb ilmiy vazifalardan biri bo'lib hisoblanadi. Mazkur tadqiqot natijalarini ekologik xavflarni kamaytirish, aholi salomatligini muhofaza qilish hamda hududiy barqaror rivojlanishni ta'minlashda amaliyotga joriy etishni taqozo etadi. Shu jihatdan qum-chang bo'ronlarining davomiyligini aniqlash va bashoratlashda zamonaviy ilmiy yondashuvlar, matematik modellar hamda axborot texnologiyalaridan foydalanish muhim ahamiyatga ega hisoblanadi.

Jahonda qum-chang bo'ronlari bilan bog'liq ekologik xavflarni kamaytirish, aholi salomatligini muhofaza qilish hamda iqlim o'zgarishi sharoitida barqaror rivojlanishini ta'minlash maqsadida ushbu hodisalarning shakllanishi, tarqalishi va davomiyligini ilmiy asosda o'rganishga yo'naltirilgan ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Bu borada, qum-chang bo'ronlarini oldindan aniqlash va bashoratlashda meteorologik kuzatuvlar, sun'iy yo'ldosh ma'lumotlari hamda statistik va sun'iy intellektga asoslangan modellarni integratsiyalash orqali yuqori aniqlikdagi prognozlarni shakllantirishga alohida e'tibor qaratilmoqda. Xususan, qum va chang bo'ronlarining davomiyligi va intensivligini baholashda vaqt qatorlari tahlili, mashinaviy o'rganish algoritmlari hamda gibrid yondashuvlardan foydalanish ilmiy-amaliy jihatdan samarali ekanligi ko'plab tadqiqotlar orqali isbotlangan. Ushbu yondashuvlar asosida qum-chang bo'ronlarining ekologik va ijtimoiy-iqtisodiy oqibatlarini kamaytirishga qaratilgan prognozlash tizimlarini yaratish, ularni hududiy monitoring va erta ogohlantirish tizimlariga integratsiya qilish masalalariga alohida e'tibor berilmoqda.

Respublikamizda iqlim o'zgarishi sharoitida qum-chang bo'ronlari bilan bog'liq ekologik xavflarni kamaytirish hamda aholi salomatligini muhofaza qilishga qaratilgan ilmiy-amaliy tadqiqotlarni olib borish va ularning natijalarini amaliyotga joriy etish bo'yicha keng ko'lamlı chora-tadbirlar amalga oshirilmoqda. Jumladan, 2022–2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi, ekologik xavfsizlikni ta'minlash, iqlim o'zgarishining salbiy oqibatlarini kamaytirish, atmosfera havosi sifatini yaxshilash hamda aholi salomatligini muhofaza qilish bo'yicha vazifalar belgilangan<sup>1</sup>. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, xususan, Orolbo'yi hududida qum-chang bo'ronlari yuzaga kelishining takrorlanuvchanligi va davomiyligini kuzatuv ma'lumotlari asosida baholash, ularni asosiy meteorologik omillar bilan bog'liq holda tahlil qilish muhim ahamiyat kasb

---

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

etadi. Shuningdek, mazkur jarayonlarni zamonaviy monitoring vositalari, statistik hamda sun'iy intellektga asoslangan modellar yordamida prognozlash va olingan natijalarni ekologik monitoring hamda erta ogohlantirish tizimlariga joriy etish dolzarb hisoblanadi.

Mazkur dissertatsiya ishi O'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, 2024-yil 24-sentabrdagi PQ-338-son "Chang bo'ronlariga qarshi kurashish va atmosfera havosini yaxshilash bo'yicha birinchi navbatdagi chora-tadbirlar to'g'risida"gi Qarori, shuningdek, atrof-muhitni muhofaza qilish, iqlim o'zgarishi oqibatlarini yumshatish hamda ekologik xavfsizlikni ta'minlashga qaratilgan boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga muayyan darajada xizmat qiladi.

**Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi.** Dissertatsiya ishi bo'yicha olib borilgan tadqiqotlar respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining V- "Atrof-muhitni muhofaza qilish, ekologik xavfsizlik va iqlim o'zgarishiga moslashuv" ustuvor yo'nalishiga to'liq mos keladi.

**Muammoning o'rganilganlik darajasi.** Qum-chang bo'ronlarining shakllanish qonuniyatlari, emissiya manbalari, atmosfera bo'ylab tarqalish jarayonlari, meteorologik va sinoptik omillar bilan bog'liqligi, iqlim tizimiga ta'siri hamda ularni monitoring qilish, baholash va prognozlash masalalari bo'yicha ko'plab ilmiy tadqiqotlar olib borilgan. Ushbu yo'nalishdagi fundamental va amaliy tadqiqotlar J.Prosero, W.Wang, N.Mahowald, J.Kok, S.Tegen, H.Schepanski, C.Pérez G.Pando, P.Knippertz, M.Todd, R.Miller, I.Sokolik, S.Bauer, A.Silva, S.Solomos, A.Abueltgasim, Ch.Spyrou, A.Benedetti, J.Baldasano, M.Boroughani, S.Pourhashemi, S.Stavros, M.Sanisales, M.Schulz, Y.Shao, D.Jacob, B.Nishonov, N.Rakhmatova, L. Shardakova, A.Belikov, A.Rasulov, B.Eshchanov, N.Abdullaev, F.Hikmatov, B.Pulatov, Z.Alimov, Z.Mamatova, B.Tleumuratova, B.Islomov hamda boshqa olimlarning ilmiy ishlarida o'z aksini topgan.

Mazkur tadqiqotlarda qum-chang bo'ronlarining yuzaga kelishiga ta'sir etuvchi tabiiy va antropogen omillar, chang aerozollarining fizik-kimyoviy xususiyatlari, atmosfera sirkulyatsiyasi bilan o'zaro aloqadorligi, uzoq masofalarga ko'chish mexanizmlari hamda ekologik va ijtimoiy-iqtisodiy oqibatlari keng o'rganilgan. Shuningdek, sun'iy yo'ldosh ma'lumotlari, masofadan zondlash texnologiyalari, geografik axborot tizimlari va matematik modellashtirish usullaridan foydalangan holda qum-chang bo'ronlarini aniqlash, monitoring qilish va prognozlash bo'yicha turli yondashuvlar ishlab chiqilgan. Qum-chang bo'ronlarining intensivligi, takrorlanishi va davomiyligini baholash, ularning havo sifati, iqlim o'zgarishi, ekotizimlar va aholi salomatligiga ta'sirini aniqlash, shuningdek global va mintaqaviy miqyosdagi prognoz modellarini yaratish hamda takomillashtirish masalalariga alohida e'tibor qaratilgan. Natijada qum-chang bo'ronlarini kuzatish, baholash va prognozlashning ilmiy-uslubiy asoslari shakllantirilgan hamda amaliyotda qo'llanilayotgan qator modellar va texnologiyalar yaratilgan. Shu bilan

birga, qum-chang bo‘ronlarining davomiyligini meteorologik omillar bilan uzviy bog‘liq holda kompleks baholash, sun‘iy intellekt va mashinali o‘qitish texnologiyalariga asoslangan gibril prognoz modellarini ishlab chiqish, prognoz natijalarining aniqligini oshirish hamda ularni ekologik monitoring va erta ogohlantirish tizimlariga integratsiya qilish masalalari yetarli darajada tadqiq etilmagan. Mazkur holat ushbu yo‘nalishda qo‘shimcha ilmiy izlanishlar olib borish zaruratini belgilaydi.

**Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi.** Dissertatsiya tadqiqoti Atrof-muhit va tabiatni muhofaza qilish texnologiyalari ilmiy-tadqiqot institutida amalga oshirilayotgan ilmiy-tadqiqot ishlari rejasiga muvofiq, ILM-202403110249 «Orolbo‘yi mintaqasi uchun chang bo‘ronlarining shakllanish sharoitlari va tarqalish mintaqalarini prognozlashtirish modelini ishlab chiqish» mavzusidagi 2024–2026-yillarga mo‘ljallangan maqsadli amaliy loyiha doirasida bajarildi.

**Tadqiqotning maqsadi** - Orolbo‘yi hududida qum-chang bo‘ronlarining shakllanishi va davomiyligini ularning rivojlanishida hal qiluvchi ahamiyatga ega bo‘lgan asosiy meteorologik omillar bilan bog‘liq holda aniqlash, zamonaviy statistik va sun‘iy intellektga asoslangan yondashuvlar yordamida oldindan prognozlash hamda olingan natijalarni ekologik monitoring va erta ogohlantirish tizimlarida qo‘llashdan iborat.

#### **Tadqiqotning vazifalari**

Qum-chang bo‘ronlarini kuzatish, baholash va bashoratlash bo‘yicha mavjud ilmiy adabiyotlar hamda ilgari bajarilgan ilmiy-tadqiqot ishlarini tahlil qilish;

Orolbo‘yi hududida qum–chang bo‘ronlarining shakllanishiga ta’sir etuvchi asosiy meteorologik omillarni aniqlash;

Qum-chang bo‘ronlarining davomiyligini bashoratlash maqsadida statistik va sun‘iy intellektga asoslangan gibril yondashuvdan foydalanib modellashtirishni amalga oshirish;

Qo‘llanilgan modellashtirish yondashuvining asosiy parametrlari va ish samaradorligini nazariy hamda tajribaviy asoslash;

Bashorat natijalarining ishonchliligi va aniqligini turli statistik mezonlar asosida baholash.

**Tadqiqotning obykti** sifatida Orolbo‘yi hududida yuzaga keladigan qum-chang bo‘ronlari va ularning shakllanishi hamda davomiyligini belgilovchi meteorologik jarayonlar olingan.

**Tadqiqotning predmeti** sifatida Orolbo‘yi hududida qum-chang bo‘ronlari hodisasining kuzatilishini belgilovchi meteorologik omillar o‘rtasidagi statistik bog‘lanishlar, ularni bashoratlashda qo‘llanilgan matematik modellar hamda prognoz natijalarining vaqt bo‘yicha o‘zgarish qonuniyatlari hisoblanadi.

**Tadqiqotning usullari.** Tadqiqot jarayonida meteorologik kuzatuv ma’lumotlarini qayta ishlash va tahlil qilish usullari, matematik va statistik tahlil qoidalari, vaqt qatorlari asosida modellashtirish, regressiya va korrelyatsion tahlil usullari, qum–chang bo‘ronlarini bashoratlashda qo‘llaniladigan statistik va sun‘iy

intellektga asoslangan yondashuvlar, prognoz natijalarini baholash mezonlari (MSE, MAE, RMSE,  $R^2$ ), shuningdek mavjud me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan metodik usullardan foydalanilgan.

#### **Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:**

Orolbo'yi hududida qum-chang bo'ronlarini qisqa muddatli prognozlashda meteorologik ma'lumotlarni statistik tahlil qilish, qayta ishlash va real vaqtga yaqin sharoitda operativ uzatishlarni inobatga olib to'liq avtomatlashtirilgan konseptual modeli ishlab chiqilgan;

Qum-chang bo'ronlarining yuzaga kelish sharoitlarini aniqlashda maksimal shamol tezligi, o'rtacha havo harorati, minimal nisbiy namlik va PCA orqali asosiy komponentlari va statistik hamda mashinaviy modellarni integratsiyalash orqali hisoblash usuli ishlab chiqilgan;

Orolbo'yi hududida qum-chang bo'ronlarini prognozlash uchun SARIMA va XGBoost modellarini integratsiyalash orqali test segmentida ECE 0,078 dan 0,028 gacha, out-of-time segmentida 0,092 dan 0,034 gacha kamayishi hisobiga gibril prognoz modeli ishlab chiqilib, model prognozi aniqligi 78,8–93 % oshganligi isbotlangan;

Orolbo'yi hududi sharoitida qum-chang bo'ronlari hodisasini 7 kun oldindan qisqa muddatli bashorat qilish imkonini beruvchi, ilmiy asoslangan va foydalanuvchilar uchun mo'ljallangan avtomatlashtirilgan (@Batir\_dusstorm\_orol\_bot) axborot-dasturiy tizim ishlab chiqilgan.

#### **Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:**

Orolbo'yi hududi sharoitida qum-chang bo'ronlarini qisqa muddatli oldindan bashoratlash uchun avtomatlashtirilgan axborot-dasturiy tizimdan foydalanish imkoniyati yaratilgan;

aniqlangan asosiy meteorologik omillar va ularning ta'sir darajasidan ekologik monitoring hamda xavflarni baholash jarayonlarida foydalanish mumkinligi isbotlangan;

tadqiqotda qo'llanilgan bashoratlash yondashuvi natijalarining aniqligi 78.8 foiz bo'lib, modellarini gidrometeorologiya hamda ekologiya sohasidagi tashkilotlar amaliy faoliyatida qo'llash mumkinligi asoslangan.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi.** Tadqiqot natijalarining ishonchliligi izlanishlarning zamonaviy statistik tahlil va modellashtirish usullaridan foydalangan holda o'tkazilganligi, nazariy tahlil va amaliy kuzatuvlar natijalarining o'zaro adekvatligi, ko'p yillik meteorologik ma'lumotlar asosida bajarilgan hisob-kitoblar hamda qum-chang bo'ronlarini bashoratlashga qaratilgan modellashtirish natijalarining amaliyotda qo'llash imkoniyati bilan asoslanadi.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati Orolbo'yi hududi sharoitida qum-chang bo'ronlari bilan bog'liq meteorologik jarayonlarni tahlil qilish hamda ularni bashoratlashda qo'llanilgan yondashuvlarning ilmiy asoslanganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati olingan natijalardan qum-chang bo'ronlarini qisqa muddatli bashoratlash, ekologik monitoring va xavflarni baholash

jarayonlarida hamda gidrometeorologiya va ekologiya sohasidagi tashkilotlar amaliy faoliyatida foydalanish imkoniyati mavjudligi bilan izohlanadi.

**Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.** Iqlim o'zgarishi sharoitida Orolbo'yi hududida qum-chang bo'ronlarining davomiyligini bashoratlash natijalar asosida:

Orolbo'yi hududi uchun ishlab chiqilgan qum-chang bo'ronlarini qisqa muddatli prognozlashning to'liq avtomatlashtirilgan konseptual modeli real vaqtga yaqin sharoitda ma'lumotlarni operativ uzatish imkoniyatlarini inobatga olgan holda amaliyotga joriy etilgan (Qoraqalpog'iston Respublikasi Ekologiya, atrof-muhitni muhofaza qilish va iqlim o'zgarishi vazirligi 2025-yil 21-avgustdagi 02/08-182-2709-son ma'lumotnomasi). Natijada Orolbo'yi hududida qum-chang bo'ronlarini oldindan aniqlash va qisqa muddatli prognozlashning aniqligi hamda tezkorligi oshirilgan;

Orolbo'yi hududi uchun qum-chang bo'ronlari prognozining aniqligini oshirish maqsadida ishlab chiqilgan, maksimal shamol tezligi, o'rtacha havo harorati, minimal nisbiy namlik ko'rsatkichlari hamda PCA orqali aniqlangan asosiy komponentlar asosida statistik va mashinaviy modellarni integratsiyalashga yo'naltirilgan hisoblash usuli amaliyotga joriy etilgan. Mazkur usul Qoraqalpog'iston Respublikasi Ekologiya, atrof-muhitni muhofaza qilish va iqlim o'zgarishi vazirligining shimoliy tumanlari - Qo'ng'iroq va Mo'ynoq bo'limlari faoliyatiga tatbiq qilingan (2025-yil 21-avgustdagi 02/08-182-2709-son ma'lumotnoma). Natijada hududda qum-chang bo'ronlarini oldindan prognozlashning aniqligi oshirilib, soha mutaxassislari uchun tezkor va ishonchli prognozlash tizimidan keng miqyosda foydalanish imkoniyati yaratilgan;

Orolbo'yi hududida qum-chang bo'ronlarini prognozlash uchun ishlab chiqilgan SARIMA modeli va XGBoost modeli integratsiyasiga asoslangan gibrid prognoz modeli amaliyotga joriy etilgan. Mazkur model Qoraqalpog'iston Respublikasi Ekologiya, atrof-muhitni muhofaza qilish va iqlim o'zgarishi vazirligi tizimida qo'llanilmoqda (2025-yil 21-avgustdagi 02/08-182-2709-son ma'lumotnoma). Natijada model prognozlash aniqligi 78,8–93 % gacha oshganligi qum-chang bo'ronlarini oldindan aniqlash, ularning xavf darajasini ishonchli baholash hamda boshqaruv qarorlarini qabul qilish samaradorligini sezilarli darajada oshirish imkoniyati yaratilgan.

Orolbo'yi hududi sharoitida qum-chang bo'ronlari hodisasini 7 kun oldindan qisqa muddatli bashorat qilish imkonini beruvchi, foydalanuvchilar uchun mo'ljallangan avtomatlashtirilgan axborot-dasturiy tizim - *@Batir\_dusstorm\_orol\_bot* nomli teleqrambot tizimi amaliyotga joriy etilgan. Mazkur tizim Qoraqalpog'iston Respublikasi Ekologiya, atrof-muhitni muhofaza qilish va iqlim o'zgarishi vazirligi tizimida qo'llanilmoqda (2025-yil 21-avgustdagi 02/08-182-2709-son ma'lumotnomasi). Natijada qum-chang bo'ronlarini 7 kun oldindan prognozlash, aholiga hamda soha mutaxassislariga tezkor va ishonchli axborot etkazish, shuningdek, favqulodda vaziyatlarning oldini olishga qaratilgan boshqaruv choralarini o'z vaqtida ko'rish imkoniyati yaratilgan.

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Tadqiqot natijalari 2 ta xalqaro va 2 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokamadan o'tkazilgan.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi.** Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 11 ta ilmiy ish chop etilgan bo'lib, shulardan O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining dissertatsiyalar asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 7 ta maqola, jumladan, 5 ta respublika va 2 ta xorijiy jurnallarda nashr etilgan.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya tarkibi kirish, to'rtta bob, umumiy xulosalar, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiya hajmi 120 betni tashkil etgan.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

**Dissertatsiyaning kirish qismida** tanlangan mavzuning dolzarbligi va zarurati asoslangan bo'lib, olib borilgan tadqiqotning asosiy maqsadi va masalalari ifodalanib, tadqiqotning obyekt va predmeti tavsiflangan. Respublikaning fan va texnologiyalari rivojlanishning ustuvor yo'nalishlariga mosligi, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan.

Dissertatsiyaning «**Orolbo'yida qum-chang bo'ronlarining shakllanishi, ekologik oqibatlar va izlanishlar tahlili**» deb nomlangan **birinchi** bobida Orolbo'yi hududida qum-chang bo'ronlarining shakllanish jarayonlari, ularning ekologik xavfliligi va salbiy oqibatlar yoritilgan. Shuningdek, ushbu yo'nalishda olib borilgan nazariy va amaliy tadqiqotlar, mavjud baholash va bashoratlash modellari hamda ilmiy yondashuvlar tahlili keltirilgan. Jumladan qum-chang bo'ronlari hodisalarining Orolbo'yi hududida shakllanishiga ta'sir etuvchi tabiiy-geografik va meteorologik omillar, shuningdek ushbu hodisalarning ekologik va ijtimoiy-iqtisodiy xavfliligi bo'yicha ilmiy manbalar asosida tahlili keltirilgan. Bobda Orol dengizi qurishi natijasida shakllangan Orolqum cho'li mintaqadagi asosiy deflyatsion hudud sifatida qaralib, uning sirt xususiyatlari qum va chang zarrachalarining ko'tarilishiga ta'siri nuqtai nazaridan baholanadi. Shamol rejimi, sirt namligi, yer qoplamining holati, vegetatsiya ko'rsatkichlari hamda kunlik va mavsumiy atmosfera jarayonlarining qum-chang bo'ronlari bilan bog'liqligi tahlil qilindi.

Hududda kuzatiladigan qum-chang bo'ronlarining diurnal va mavsumiy o'zgarish qonuniyatlari umumlantirilib, ularning yil davomida taqsimlanish xususiyatlari ilmiy adabiyotlar asosida yoritildi. Shuningdek, Ustyurt platosi va Qoraqalpog'istonning shimoliy qismidagi geomorfologik va aerodinamik sharoitlarning shamol tezligi va chang ko'tarilishi jarayonlariga ta'siri tahlil jihatdan ko'rib chiqildi.

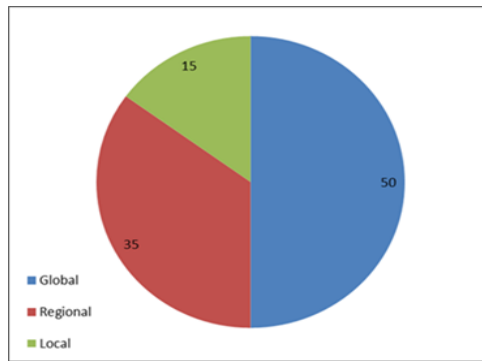
Qum-chang bo'ron (keyingi o'rinlarda QChB) larini baholashda shamol tezligi, ko'rinish masofasi va optik so'nish koeffitsienti asosiy meteorologik mezonlar bo'lib, ushbu parametrlar bo'ronning kuchi, xavf darajasi va tarqalish sharoitlarini aniqlashda muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega hisoblanadi. Quyidagi 1-jadvalda qum-chang bo'ronlarini tasniflash uchun qo'llaniladigan asosiy ko'rsatkichlar va ularning operatsion talqinlari keltirilgan.

## Qum-chang bo‘ronini aniqlash uchun amaliy mezonlar

Holat	10 m shamol (o‘rt./gust)	Ko‘rinish V (km)	$\sigma_{ext} \approx 3.9/V$ (km <sup>-1</sup> )	Izoh / operatsion talqin
Ko‘tarilgan chang/qum	O‘rtacha < 12–15 m/s, Gust < 18–20 m/s	1–3	$\approx 1.3 - 3.9$	Uzoqdan adveksiya; mahalliy ko‘tarilish zaif
QChB (bo‘ron)	O‘rtacha $\geq 15-18$ m/s yoki Gust $\geq 20-22$ m/s	$\leq 1$	$\geq 3.9$	Mahalliy ko‘tarilish faol; transport xavfi yuqori
Kuchli QChB	O‘rtacha $\geq 20$ m/s yoki Gust $\geq 25$ m/s	$\leq 0.5$	$\geq 7.8$	Juda past ko‘rinish; tezkor choralar zarur

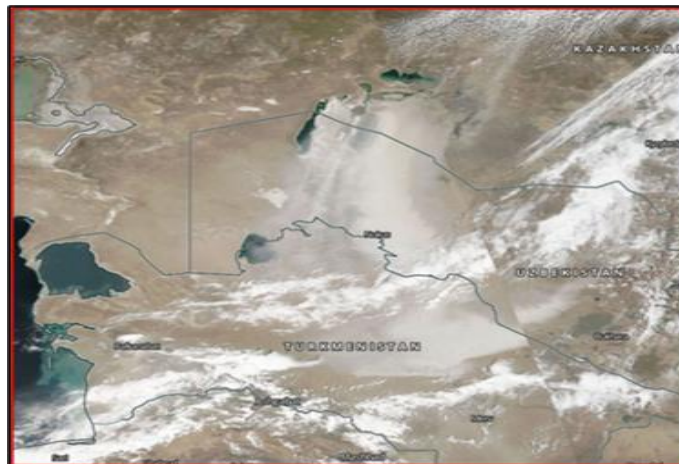
Jadvalda keltirilgan ostona qiymatlar amaliy kuzatuvlar asosida shakllangan tipik yo‘riqnomaga bo‘lib, Koschmieder munosabati  $V \approx 3.9/\sigma_{ext}$  orqali aniqlandi. Hududning shamol rejimi, sirt namligi va qo‘llanilayotgan sensor turlari farq qilganda bu chegaralar mos ravishda kalibrlandi. Yakuniy baholash sinoptik sharoit, aerazol (PM) ko‘rsatkichlari, mavsumiylik va xavf darajasini hisobga olgan holda amalga oshirildi.

Bobning muhim qismi sifatida qum-chang bo‘ronlarini bashoratlash bo‘yicha global, mintaqaviy va mahalliy ilmiy izlanishlarning hozirgi holati, qo‘llanilayotgan metodlar va ularning Orolbo‘yi sharoitiga mosligi tizimli o‘rganilgan. QChBlarni oldindan ogohlantirish zamonaviy yondashuvlari uch asosiy guruhga - dinamik modellar (WRF-Chem, CAMx), statistik-ehtimolliq usullar (SARIMA/SARIMAX, logistika va gradient boosting) hamda masofadan zondlash va ERA5 qayta tahliliga tayanadigan ma‘lumotga asoslangan (data-driven) yondashuvlarga ajratiladi. Sun‘iy yo‘ldosh ko‘rsatkichlari (AOD, NDVI/LAI, LST) va yer usti monitoringi (PM10/PM2.5) integratsiyasi QChBlarning vaqt-makon dinamikasini aniqlashda muhim omil sifatida ko‘rsatiladi. Bo‘ronlarning ijtimoiy-iqtisodiy va ekologik ta‘siri ko‘p qirrali ekani qayd etilib, transport va aviatsiya xavfi, energetika tarmoqlarining changlanishi, qishloq xo‘jaligi ekinlari hosildorligining kamayishi, tuproq degradatsiyasi, suv havzalarining sho‘rlanishi va aholi salomatligida respirator-kardiovaskulyar kasalliklarning ortishi kabi oqibatlar asoslab berilgan. Orolbo‘yi sharoitida Orolqum, qurigan deltalarning sho‘rxok maydonlari va deflyatsiya zonalarini changning uzoq masofalarga ko‘chishini kuchaytirishi ta‘kidlangan. Bo‘limda xalqaro olimlar L. Tegen, K. Knippertz, M. Todd, Y. Wang, M. Shao, Y. Shao, G. Stenchikov, Wang Tao va boshqalarning, shuningdek mintaqaviy va mahalliy tadqiqotchilar - N. Ravshanov, B.E. Nishonov, A. Rasulov, B. Eshchanov, A.R.Ahmedova, Z. Mamatova, N. Abdullaev, B. Tleumuratova, Belikov, Raxmatova va boshqa olimlarning ilmiy ishlari tahlil qilingan. Ushbu tadqiqotlar asosida Orolbo‘yi ekologik tizimidagi o‘zgarishlar, gidrometeorologik jarayonlar hamda qum va chang emissiyasi bilan bog‘liq ilmiy manbalar tizimli ravishda umumlashtirilgan. Xalqaro tashkilotlar (WHO, UNEP, FAO, Jahon banki) ma‘lumotlariga tayangan holda QChBlar iqtisodiyotga yillik YAIMning 1-3 % gacha zarar yetkazishi keltirilgan. Bo‘lim yakunida global, mintaqaviy va lokal darajadagi tadqiqotlar ulushi taqsimoti 1-rasmda keltirilgan diagramma mavjud ilmiy tadqiqotlarning miqyos bo‘yicha taqsimotini yaqqol namoyon etadi.



**1-rasm. QChBlariga oid tadqiqotlar ilmiy adabiyotlarning global, mintaqaviy va mahalliy darajalarda taqsimlanishi.**

Bunda tadqiqotlarning 50 % global, 35 % mintaqaviy va atigi 15 % lokal darajadagi ishlarga to'g'ri keladi. Bu shundan dalolat beradiki, qum-chang bo'ronlari bo'yicha ilmiy izlanishlarning asosiy qismi umumglobal iqlim jarayonlari, atmosfera dinamikasi va transchegaraviy aerosol oqimlarini o'rganishga qaratilgan. Mintaqaviy darajadagi tadqiqotlar esa ma'lum bir geografik mintaq bilan chegaralangan bo'lib, baribir hududning o'ziga xos xususiyatlarini to'la qamrab ololmaydi. Qum-chang bo'ronlarini bashoratlash bo'yicha mahalliy darajadagi tadqiqotlar ulushi (15 %) juda kamligi Orolbo'yi kabi ekologik nozik hududlar uchun jiddiy ilmiy bo'shliq mavjudligini ko'rsatadi. Chunki qum-chang bo'ronlarining shakllanishi va davomiyligi mahalliy relyef, qurigan dengiz tubining tuzilishi, tuproq-suv rejimi, landshaftning buzilish darajasi, mahalliy shamol rejimi kabi omillar bilan chambarchas bog'liq. Global yoki mintaqaviy modellarda bu omillar odatda yiriklashtirilgan yoki soddalashtirilgan holda hisobga olinadi, natijada aniq prognozlar olish qiyinlashadi. 2-rasmda Orolbo'yi va unga tutash keng hududlarda kuzatilgan yirik qum-chang bo'ronining sun'iy yo'ldosh tasviri keltirilgan bo'lib, u bo'ron jarayonining miqyosi va tarqalish dinamikasini aniq aks ettiradi.



**2-rasm. QChBlari kuzatilgan vaqtdagi sun'iy yo'ldoshdan olingan tasviri.**

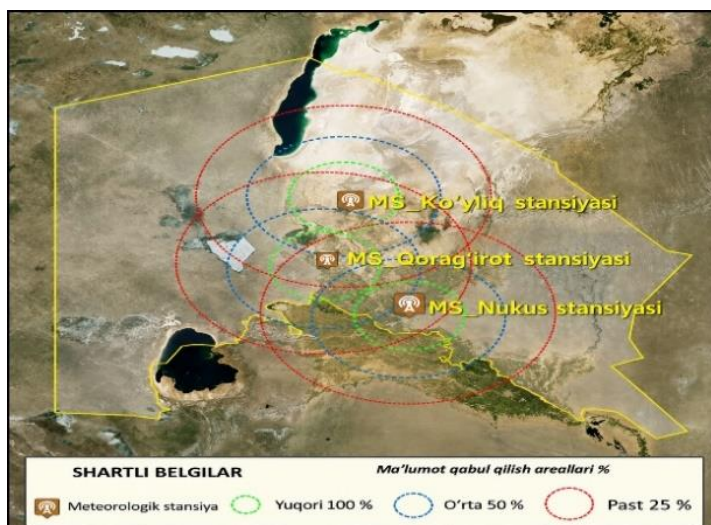
Tasvirdan ko'rinib turibdiki, chang massa oqimlari Orol dengizi atrofidagi qurigan maydonlardan ko'tarilgan holda Turkmaniston, Qoraqalpog'iston va O'zbekistonning shimoliy hududlari bo'ylab shimol-sharq yo'nalishida harakatlangan. Bu jarayon atmosfera oqimlarining kuchi va yo'nalishi qum-chang

bo‘ronlarining shakllanishi hamda ularning tarqalish masofasiga bevosita ta‘sir ko‘rsatishini tasdiqlaydi.

Bo‘ron maydonining sun‘iy yo‘ldoshda aniq ko‘rinishi turli hududlarda ko‘rinuvchanlikning keskin pasayishi, transport va sog‘liq uchun xavfli sharoitlarning yuzaga kelganini ko‘rsatadi. Shuningdek, chang zarralari atmosfera qatlamlari orqali yuqori balandliklarga ko‘tarilib, uzoq masofalarga ko‘chishi kuzatilmoqda. Bu holat Orolbo‘yi uchun xos bo‘lgan ekologik xavfning faqat lokal emas, balki mintaqaviy va hatto transchegaraviy darajada ahamiyatga ega ekanini yana bir bor isbotlaydi.

Mazkur tasvir chang bo‘ronlarining shakllanish mexanizmlarini chuqur o‘rganish, ular uchun meteorologik omillarning ta‘sirini aniqlash va kelgusida aniq prognozlash modellarini yaratish zaruriyatini yanada kuchaytiradi. Bob yakunida Orolbo‘yida qum-chang bo‘ronlari shakllanishi, ularning ekologik xavflari, salomatlikka zararli oqibatlari va mavjud ilmiy izlanishlar tahlili ushbu mavzuning dolzarbligini yanada tasdiqlashi, shuningdek, keyingi boblarda SARIMA va XGBoost asosida gibrid prognozlash modelini ishlab chiqish uchun ilmiy zamin yaratishi ko‘rsatib o‘tilgan.

Dissertatsiyaning «**Tadqiqot obyekti, metodologiyasi va materiallarning nazariy tahlili**» deb nomlangan **ikkinchi** bobida tadqiqotning obyekti va predmeti asoslanib, foydalanilgan ma‘lumotlar manbalari, kuzatuv materiallari hamda ilmiy-tadqiqot metodlari batafsil yoritilgan. Bobda qum-chang bo‘ronlarini baholash va prognozlashda qo‘llanilgan statistik, matematik hamda sun‘iy intellekt modellarining nazariy asoslari keltirilgan. Shuningdek, vaqt qatorlari tahlili, modellashtirish algoritmlari, prognoz natijalarini baholash mezonlari hamda ma‘lumotlarni qayta ishlash metodologiyasi bayon etilgan. Tadqiqotlar Orol dengizining qurigan tubiga eng yaqin va qum-chang bo‘ronlari yuqori chastotada kuzatiladigan Mo‘ynoq, Qo‘ng‘irot tumanlari hamda Nukus shahriga oid ma‘lumotlarga tayangan. Ushbu hududlarda shamol eroziyasi intensivligi, deflyatsion o‘choqlarning kengligi va vegetatsiya zichligining pastligi bo‘ronlar shakllanishi uchun qulay aeroekologik sharoit yaratishi aniqlangan (3-rasm).



**3-rasm. Tadqiqot obyektida tanlangan meteostansiyalar.**

Hududlar iqlimi keskin kontinental bo‘lib, yog‘ingarchilik juda kam (100–150 mm/yil), yozda harorat +45 °C gacha ba‘zi hollarda undan ham yuqoriroq ko‘tarilib, qishda o‘rtacha –5, 10 °C gacha pasayadi. Shamolning o‘rtacha yillik tezligi 4–6 m/s bo‘lsa, bo‘ronli kunlarda 15–20 m/s gacha va ba‘zida undan ham yuqori kechadi. Shamolning ustun yo‘nalishlari g‘arb va shimoli-g‘arb bo‘lib, bu Orolqum va Ustyurt platosidan chang ko‘chishini kuchaytiradi. Shu sababli Mazkur hududlar qum-chang bo‘ronlarining asosiy manbasi va tranzit zonasi hisoblanadi. Meteostansiyalar tomonidan qayd etilgan ko‘p yillik ma‘lumotlar bo‘ronlar chastotasi, davomiyligi va ularning meteorologik omillar bilan bog‘liqligini aniqlash imkonini beradi. Quyidagi 2-jadvalda tadqiqotda qo‘llanilgan birlamchi meteorologik ma‘lumotlarning standartlashtirilgan shaklini aks ettiradi. Nukus meteostansiyasi tomonidan WMO talablariga muvofiq qayd etiladigan kunlik kuzatuvlar (havo harorati, nisbiy namlik, shamolning o‘rtacha va maksimal zarbasi, ko‘rinuvchanlik, yog‘ingarchilik, sinoptik hodisalar va tuproq harorati) qum-chang bo‘ronlarining davomiyligi va intensivligini baholashda asosiy kirish ma‘lumotlari sifatida foydalanildi. Jadvalda keltirilgan parametrlar keyinchalik QC (sifat nazorati), xususiyatlar yaratish (lag/rolling), gibrid modellashtirish (SARIMAX + XGBoost) va epizodlarni verifikatsiya qilish jarayonlarida ishlatilgan bo‘lib, tadqiqotning barcha hisob-kitoblari aynan shu birlamchi kuzatuvlar bazasiga tayanadi.

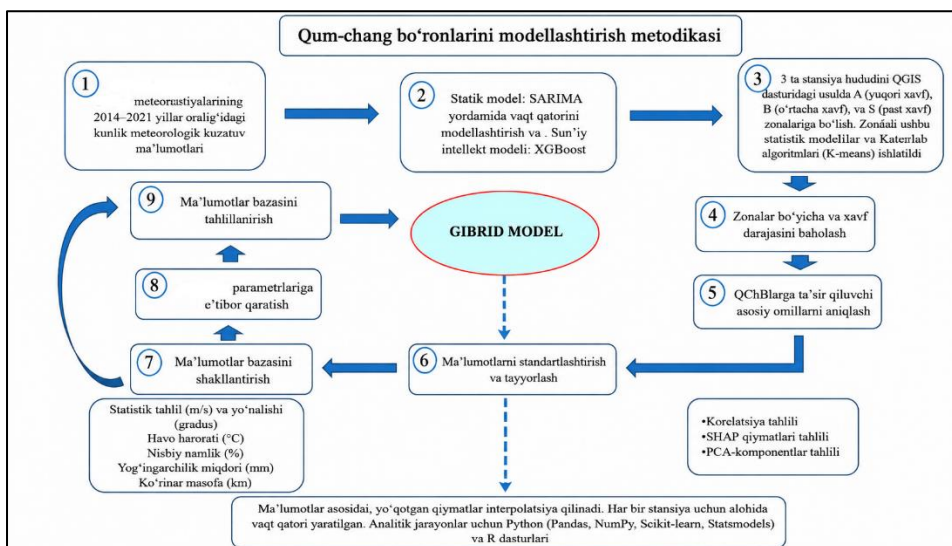
Tadqiqotning ma‘lumot bazasi Nukus meteostansiyasining 2014–2023 yillardagi kunlik kuzatuvlari, shuningdek, Open-Meteo API orqali olingan 30 kunlik “backfill” va 7 kunlik prognoz ma‘lumotlaridan iborat. Stansiya o‘lchovlari harorat, nisbiy namlik, shamolning o‘rtacha va maksimal tezligi, yog‘ingarchilik, meteorologik ko‘rinish masofasi (MOR) va sinoptik hodisalar haqidagi WMO kodlari bilan birga qayd etilgan. Tuproq haroratining yuqori qatlam bo‘yicha kuzatuvlari ham jalb etilgan. Jadval ko‘rinishidagi birlamchi o‘lchov shakli 2-jadvalda keltirilgan.

## 2-Jadval.

### Tadqiqotda asosan foydalanilgan Hidrometeorologiya xizmati agentligining meteorologik ma‘lumotlar shakli.

Nukus meteostansiyasi																			
Date/Para meters	Air temperature			Air humidity		Wind speed			Meteorologica l visibility	Precipitation			Meteorological processes (day)					soil temperature	
	T aver age	T min	T max	f aver	f min	average	max	sharo'ha lishi		night	day	Summary	Rain	Snow	fog	dust storms	Dust storm	min	max
Unit of measur ement	(°C)	(°C)	(°C)	(%)	(%)	(m/s)	(m/s)	(°)	(m)	(m m)	(mm )	(m m)	(day)	(day)	(da y)	days	hours	(°C)	(°C)
24 05 18	23,1	14	30,5	25	9	4,8	11	70	2000							0		52	13
25 05 18	23,4	11,4	34,3	21	8	3,5	10	70	2000							0		55	11
26 05 18	26,7	13,3	37,5	25	11	2	7	110	2000							0		61	9
27 05 18	19,6	15,4	31,1	42	25	5,6	18	340	200		0.0	0.0	6			1	14	32	15
28 05 18	15,8	6,8	22,3	32	17	3	10	340	2000							1	3	49	7
29 05 18	18,7	7,5	28,1	33	12	2,6	12	110	1000							1	3	48	5
30 05 18	17,6	12,6	23,7	31	16	5	12	290	2000							1	2	48	12
31 05 18	20,5	15,2	28,4	29	15	3,1	11	45	2000							0		50	12

Qum–chang bo‘ronlarini prognozlashda sun‘iy intellekt texnologiyasi imkoniyatlaridan foydalanish masalalari ham yoritilgan bo‘lib, taklif etilgan gibrid model yondashuvning umumiy ishlash sxemasi 4-rasmda keltirilgan.



**4-rasm. Qum–chang bo‘ronlarini gibrid model asosida bashoratlash metodik sxemasi.**

Mazkur sxema asosida prognozlash jarayoni meteorologik kuzatuv ma'lumotlarini yig'ish, ularni sifat nazoratidan o'tkazish va tayyorlash, asosiy xususiyatlarni shakllantirish hamda SARIMA va XGBoost modellarini o'zida birlashtirgan gibrid modellashtirish bosqichlaridan iborat ekanligi ko'rsatilgan. XGBoost modelining nolinear bog'liqliklarni aniqlash qobiliyati, sinflar nomutanosibli sharoitida moslashuvchanligi va yuqori prognoz aniqligi alohida asoslab berilgan.

Modeldan olingan dastlabki ehtimollik qiymatlari isotonic regression usuli yordamida kalibrlanib, real kuzatilgan chastotalarga moslashtirilgan. Kalibrlangan ehtimollar 3 kunlik silliqlash jarayoni orqali barqarorlashtirilib, **yashil, sariq** va **qizil** xavf toifalariga ajratilgan holda operatsion foydalanish uchun moslashtirilgan. Ushbu yondashuv prognoz natijalari bilan amaliy ogohlantirish tizimi o'rtasidagi uzviy bog'liqlikni barqaror ta'minlaydi. Gibrid model natijalari SHAP tahlili va metodikasi yordamida izohlanib, qum–chang bo'ronlari kuzatilishida eng katta ta'sir ko'rsatuvchi omillar aniqlangan. Jumladan, maksimal va zarba shamol tezliklari, minimal nisbiy namlik, vegetatsiya indeksining past qiymatlari (NDVI), so'nggi 7–30 kun davomida yog'ingarchilikning kuzatilgan yoki kuzatilmaganligi miqdori hamda chang potensial indeksi (DPI) asosiy omillar sifatida ajratib ko'rsatildi. Ushbu natijalar qum–chang bo'ronlarining shakllanishiga oid sinoptik va fizik mexanizmlar bilan mos keladi.

Ushbu modellashtirish yondashuvi vaqt qatorlari tahlili va ma'lumotlarga asoslangan mashinaviy o'rganish qonuniyatlariga tayangan bo'lib, unda qum-chang bo'ronlari hodisasining mavsumiyli va dinamikasi SARIMA modeli orqali, murakkab nolinear bog'liqliklar esa XGBoost modeli yordamida ifodalanadi. Gibrid yondashuv statistik va sun'iy intellekt modellari afzalliklarini birlashtirib, bashorat aniqligi va barqarorligini oshirishga xizmat qiladi.

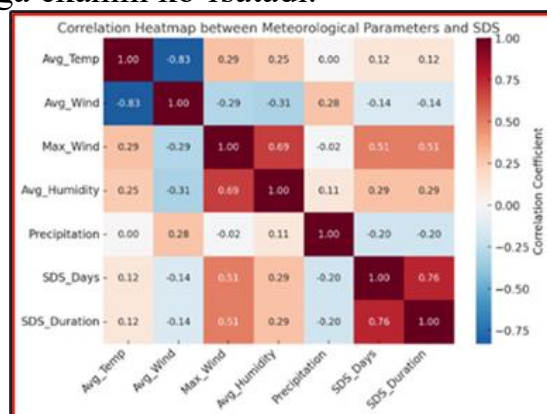
Gibrid modellashtirishning umumiy matematik ifodasi quyidagicha beriladi:

$$y(t) = SARIMA(y(t-1), ...) + XGBoost(X(t)) + \varepsilon(t). \quad (1)$$

bu yerda:  $y(t)$  - qum-chang bo‘ronlari hodisasining  $t$ -vaqtdagi qiymati, SARIMA( $y(t-1)$ , ...) - vaqt qatorining chiziqli va mavsumiy komponentlarini ifodalovchi statistik model, XGBoost( $X(t)$ ) — meteorologik omillarning nolinear ta’sirini hisobga oluvchi sun’iy intellekt modeli,  $\varepsilon(t)$  esa tasodifiy xatolikni bildiradi.

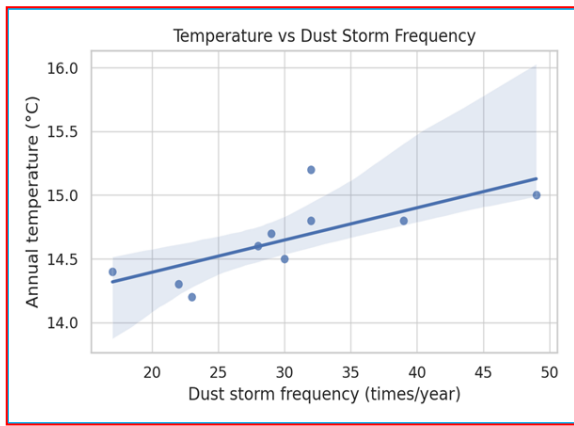
Shunday qilib Orolbo‘yi sharoitida qum-chang bo‘ronlarini modellashtirish uchun zarur bo‘lgan hududiy, meteorologik, statistik va sun’iy intellektka asoslangan metodologiyaning to‘liq ilmiy asosini yaratadi va keyingi boblarda keltiriladigan prognozlash natijalari uchun puxta poydevor vazifasini bajaradi.

Dissertatsiyaning «**Iqlimiy o‘zgarishlar fonida qum-chang bo‘ronlarini bashoratlashning tahliliy natijalari**» deb nomlangan **uchinchi** bobida Orolbo‘yi hududida iqlim ko‘rsatkichlarining uzoq muddatli o‘zgarish tendensiyalari hamda ularning qum-chang bo‘ronlarining shakllanishi va xavflilik darajasiga ta’siri tahlil qilingan. Qum-chang bo‘ronlarining hozirgi davrdagi chastotasi, davomiyligi va intensivligi asosiy meteorologik omillar bilan bog‘liq holda baholanib, statistik tahlil natijalari keltirilgan. Shuningdek, SARIMA va sun’iy intellektga asoslangan gibrid modellar yordamida olingan prognoz natijalari taqqoslab tahlil qilinib, ularning bashorat aniqligi va amaliy qo‘llash imkoniyatlari asoslab berilgan. 5-rasmda qum-chang bo‘ronlarining chastotasi va davomiyligi bilan asosiy meteorologik ko‘rsatkichlar o‘rtasidagi o‘zaro bog‘liqliklar aks ettirilgan. Korrelyatsiya matritsasi shamolning maksimal tezligi qum-chang bo‘ronlari davomiyligi bilan eng kuchli musbat bog‘lanishga ega ekanini ko‘rsatadi.

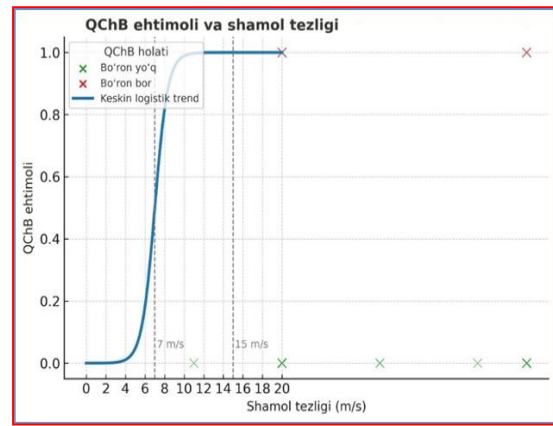


**5-rasm. QChB va meteorologik omillar o‘rtasidagi pearson korrelyatsiyasi.**

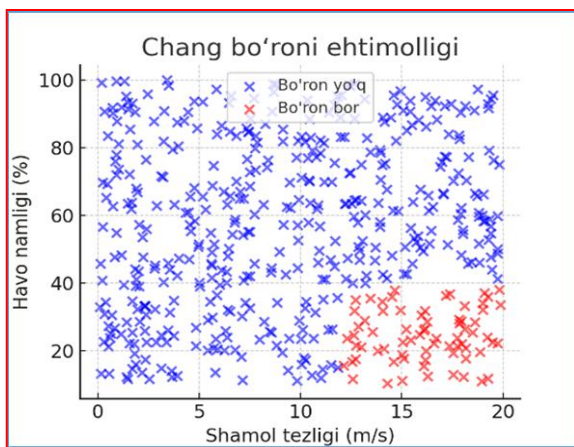
O‘rtacha nisbiy namlikning pasayishi bo‘ron xavfini oshirishi, yog‘ingarchilik esa qum-chang bo‘ron chastotasini pasaytiruvchi omil sifatida namoyon bo‘lishi aniqlangan. Harorat o‘zgarishi shamol bilan teskari bog‘liq bo‘lgani uchun qum-chang bo‘ronlariga bilvosita ta’sir ko‘rsatadi. Umuman, matritsa natijalari qum-chang bo‘ronlari shakllanishida shamol rejimi va sirtning quruqligi asosiy belgilovchi omillar ekanini tasdiqlaydi. Quyidagi 6-rasmda Orolbo‘yida qum-chang bo‘ronlari chastotasi bilan asosiy meteorologik omillar o‘rtasidagi bog‘lanishlar ko‘rsatilgan. Harorat, shamol tezligi, minimal harorat, yog‘ingarchilik va namlikning o‘zgarishi QChBlarning shakllanishiga qanday ta’sir qilishi regressiya chiziqlari orqali aks ettirilgan. Grafiklar bo‘ronlar chastotasi ko‘proq shamol kuchi va yuqori harorat sharoitida ortishini, yog‘ingarchilik esa aksincha kamaytirishini ko‘rsatadi.



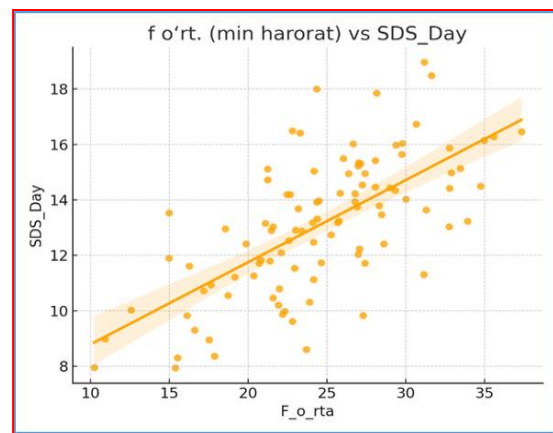
a) Yillik harorat va chang bo‘ronlari chastotasi o‘rtasidagi bog‘liqlik



b) Shamol tezligi va QChB ehtimoli o‘rtasidagi bog‘liqlik



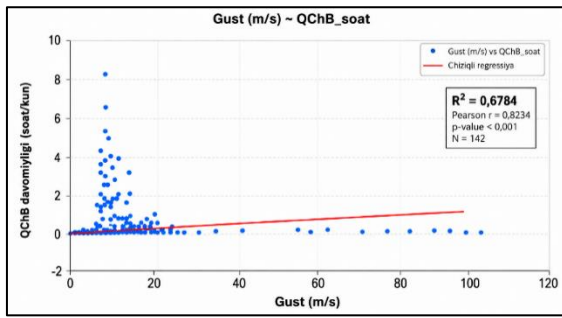
c) Shamol–namlik sharoitida chang bo‘roni ehtimoli



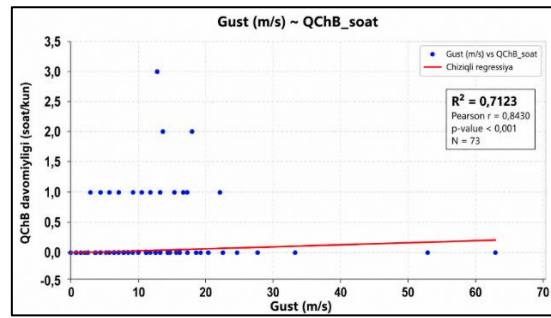
d) Min harorat – QChB va kun korrelyatsiyasi

## 6-rasm. Orolbo‘yi QChBlari chastotasi va asosiy meteorologik omillar o‘rtasidagi bog‘liqliklar.

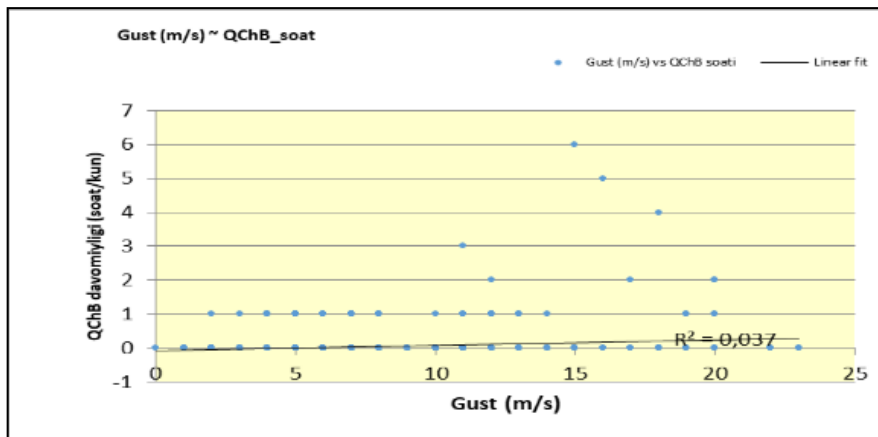
Yuqoridagi tahlillardan ko‘rinadiki, qum-chang bo‘ronlari chastotasi bir nechta asosiy meteorologik omillar bilan sezilarli darajada bog‘liq. Harorat oshishi bilan bo‘ronlar soni ortib borishi kuzatiladi, bu esa yer yuzasining yanada quruqlashishi va deflyatsiya potentsialining kuchayishi bilan izohlanadi. Shamol tezligi ham eng muhim drayver (harakatlantiruvchi omili) lardan biri bo‘lib, yuqori shamol sharoitida bo‘ronlar chastotasi keskin oshadi. Aksincha, yog‘ingarchilik ko‘payganda chang ko‘tarilishi kamayadi, chunki namlangan sirt zarrachalarning ko‘chishini cheklaydi. Shuningdek, minimal harorat va nisbiy namlikning past bo‘lishi bo‘ronlarning faollashuviga zamin yaratadi. Umuman olganda, grafiklar QChBlarning shakllanishi kuchli shamol, yuqori harorat va kam yog‘in sharoitida eng faol bo‘lishini tasdiqlaydi. Eng muhim drayverlardan biri bo‘lgan shamolni quyidagi rasmda ko‘ribchiqamiz.



a) Mo'ynoq



b) Qo'ng'iro't



c) Nukus

**7-rasm. Shamol impulsu (Gust, m/s) va qum-chang bo'roni davomiyligi (soat/kun) o'rtasidagi chiziqli bog'lanish (2014–2023).**

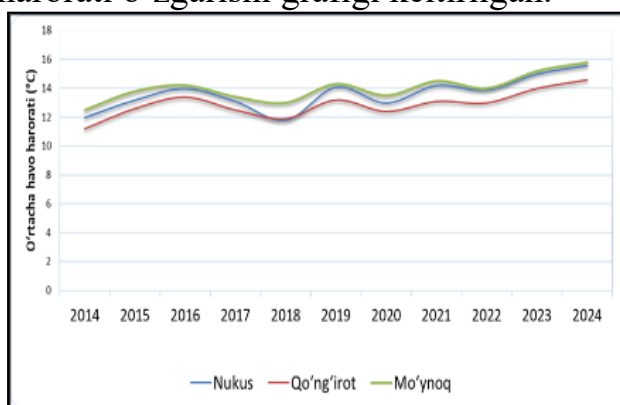
Yuqoridagi 7-rasmda Mo'ynoq (a), Qo'ng'iro't (b) va Nukus (c) meteostansiyalarida shamol impulsu (Gust, m/s) bilan qum-chang bo'roni davomiyligi (soat/kun) o'rtasidagi bog'liqliklar taqqoslab ko'rsatilgan. Har uchala grafikda ham abstsissada shamolning maksimal zarbasi, ordinatada esa kuzatilgan QChB davomiyligi keltirilgan bo'lib, ustiga chiziqli regressiya chizig'i va mos determinatsiya koeffitsienti ( $R^2$ ) qo'yilgan. Bu ko'rsatkichlar shamol impulsining bo'ron davomiyligini qanchalik "tushuntira olishi"ni baholash imkonini beradi. a) Mo'ynoq stansiyasida gust qiymatlari 0 dan 100 m/s gacha bo'lgan oraliqda o'zgarib, ayrim kunlarda bo'ron davomiyligi 3–4 soatgacha yetgan nuqtalar kuzatiladi. Regressiya chizig'i ijobiy yo'nalishga ega bo'lsa-da,  $R^2$  juda past bo'lib, shamol impulsining o'zi davomiylikni to'liq izohlab bera olmasligini ko'rsatadi. Biroq umumiy tendensiya kuchli shamol zarbalari bo'lgan kunlarda bo'ronning biroz cho'zilishga moyilligini bildiradi.

b) Qo'ng'iro't stansiyasida gust diapazoni 0–60 m/s atrofida bo'lib, aksariyat nuqtalar nisbatan qisqa davomiylik qiymatlarida jamlangan. Bu yerda regressiya chizig'i deyarli gorizontal bo'lib,  $R^2$  qiymati juda kichik. Bu esa Qo'ng'iro'tda shamol zarbasi bilan QChB davomiyligi o'rtasida kuchli chiziqli bog'liqlik yo'qligini, ehtimol, boshqa omillar (masalan, sirt namligi, manba zonaga masofa, sinoptik holat) muhimroq rol o'ynashini anglatadi.

c) Nukus stansiyasida ham shunga o'xshash holat kuzatiladi: gust qiymatlari nisbatan past diapazonda, bo'ron davomiyligi esa odatda 1 soatdan kam bo'lib,

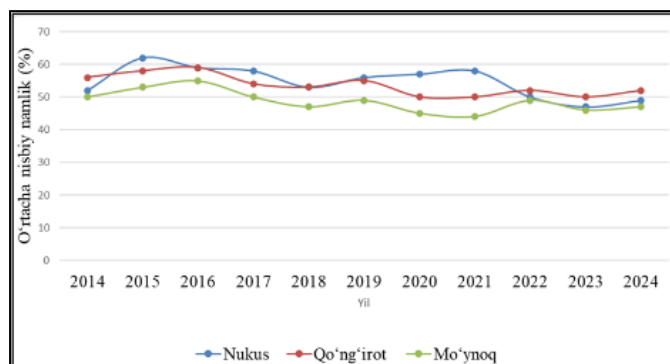
nuqtalar pastki sohada to‘plangan. Regressiya chizig‘i deyarli tekis,  $R^2$  juda past. Bu Nukusda QChBlarning ko‘proq tranzit xarakterga ega ekanini, ya‘ni bo‘ronlar asosan boshqa hududlardan ko‘chib kelib, bu yerda qisqa muddatga ta‘sir ko‘rsatishini ko‘rsatadi. Umuman, uchala grafik shamol impulsi zarur, ammo yetarli shart emasligini, QChB davomiyligini tushuntirishda kompleks meteorologik va sirt omillarini birgalikda hisobga olish zarurligini tasdiqlaydi.

Yuqoridagi uchta rasm Orolbo‘yi hududida (Mo‘ynoq, Qo‘ng‘irot, Nukus) 2014–2024 yillar davrida asosiy iqlimiy ko‘rsatkichlar dinamikasini tizimli ravishda aks ettiradi va qum-chang bo‘ronlari shakllanishi bilan bevosita bog‘liq bo‘lgan fon sharoitni ilmiy asosda tavsiflash imkonini beradi. 8-rasmda esa 2014–2024 yillarda o‘rtacha yillik havo harorati o‘zgarishi grafigi keltirilgan.



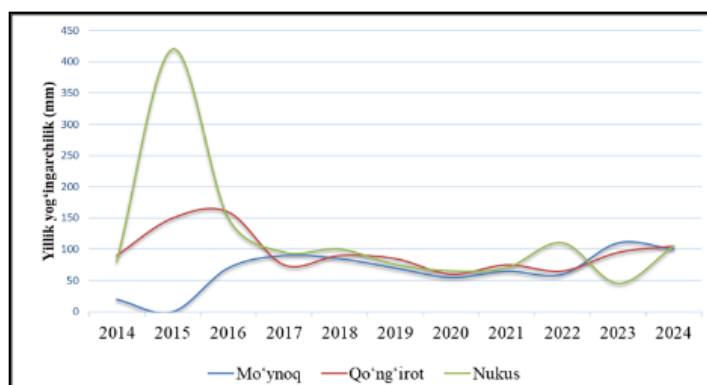
**8-rasm. 2014–2024 yillarda o‘rtacha havo haroratining dinamikasi.**

Diagrammadan ko‘rinib turibdiki, barcha uchala hududda ham haroratda barqaror o‘shish tendensiyasi mavjud: dastlabki yillarda 11–12 °C atrofida bo‘lgan o‘rtacha yillik harorat keyingi yillarda 14–16 °C gacha ko‘tarilgan. Ayrim yillarda kichik pasayishlar kuzatilgan bo‘lsa-da, umumiy trend ijobiy bo‘lib, iqlimning isishi jarayoni aniq namoyon bo‘ladi. Mo‘ynoq tumani, Orol dengizining sobiq qirg‘oqlariga eng yaqin hudud sifatida, ko‘pincha eng yuqori haroratlar bilan ajralib turadi; bu hududda yozgi ekstremal issiqliklar, yer sirtining tez qizishi va kuchli bug‘lanish deflyatsiya potentsialini yanada kuchaytiradi. Qo‘ng‘irot va Nukusda ham harorat oshishi qayd etilgan bo‘lib, bu mintaqa bo‘yicha umumiy isish fonida QChBlar uchun yanada qulay energiya sharoitlari shakllanayotganini ko‘rsatadi. 9-rasmda o‘rtacha nisbiy namlikning hududlar bo‘yicha 2014–2024 yillardagi dinamikasi tasvirlangan.



**9-rasm o‘rtacha nisbiy namlikning hududlar bo‘yicha dinamikasi.**

Grafikka ko‘ra, barcha stansiyalar kesimida nisbiy namlik 50–70 % oralig‘ida tebrangan bo‘lsa-da, so‘nggi yillarda ayrim hududlarda pastga qarab siljish tendensiyasi kuzatiladi. Mo‘ynoqda nisbiy namlik darajasi Nukus va Qo‘ng‘irotga nisbatan biroz pastroq bo‘lib, bu hududning yanada quruq iqlimga ega ekanligini tasdiqlaydi. Nisbiy namlikning pasayishi havo qatlamining quruqlashuviga, sirt namligining kamayishiga va natijada chang zarrachalarining havoga ko‘tarilish ehtimoli ortishiga olib keladi. Ayniqsa bahor–yoz oylarida namlikning pasayishi va haroratning ko‘tarilishi bir vaqtda sodir bo‘lganda, QChBlarning boshlanishi uchun optimal sharoitlar vujudga keladi. Namlik grafigi iqlimiy o‘zgarishlar fonida “quruqlashish trendi” mavjudligini ko‘rsatib, bu jarayon qum-chang bo‘ronlari xavfini kuchaytirayotganini ilmiy jihatdan asoslaydi. 10-rasmda esa 2014–2024 yillarda yillik yog‘ingarchilik miqdorining dinamikasi keltirilgan.

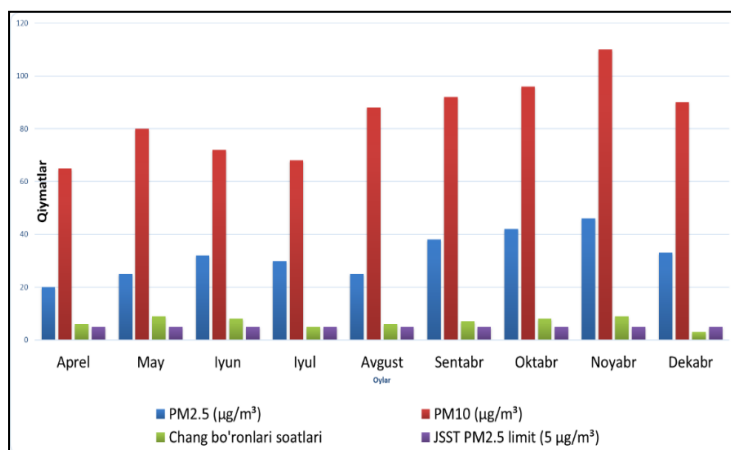


**10-rasm tahlili. 2014–2024 yillarda yillik yog‘ingarchilik dinamikasi.**

Diagrammadan ko‘rinadiki, davr boshida ayrim yillarda yog‘in miqdori nisbatan yuqori bo‘lgan bo‘lsa-da, keyingi yillarda keskin pasayish kuzatiladi va bir qator yillarda yog‘in juda past darajalarda (50–100 mm/yil atrofida) saqlanib qolgan. Mo‘ynoq tumanida yog‘in eng kam miqdorda qayd etilgan bo‘lib, bu hududning ekstremal arid sharoitga ega ekanligini yana bir bor tasdiqlaydi. Qo‘ng‘irot va Nukusda ham yog‘in miqdorining kamayishi tendensiyasi kuzatiladi, ammo ayrim yillarda qisqa muddatli “sakrashlar” mavjud. Yog‘ingarchilikning umumiy pasayishi deflyatsion sirtlarning namlanish darajasini kamaytirib, tuproqning ustki qatlamini bo‘sh, chang ko‘tarilishiga moyil holatga olib keladi. Mavsumiy yog‘in rejimining buzilishi, ya‘ni bahor va kuzda yetarli namlanish bo‘lmasligi natijasida vegetatsiya qoplaminin siyraklashuvi va cho‘llanish jarayonlari jadallashadi.

Uchala rasm birgalikda tahlil qilinganda, Orolbo‘yi hududida 2014–2024-yillar davomida iqlimiy fonning quyidagi yo‘nalishda o‘zgarayotgani yaqqol ko‘rinadi: havo harorati ortib bormoqda, nisbiy namlik biroz pasayishga moyil, yillik yog‘in esa barqaror ravishda kamaymoqda. Bu uch omilning kombinatsiyasi mintaqada quruq, issiq va shamolli sharoitlarning ko‘payishiga, tuproq va sho‘rxok sirtlarning tez qurib qolishiga va natijada qum-chang bo‘ronlari ehtimolining ortishiga xizmat qiladi. Shunday qilib, uchta rasmda iqlimiy o‘zgarishlar fonida QChBlarning kuchayib borayotgan xavfini ilmiy asoslashda muhim daliliy material bo‘lib, keyingi boblarda keltirilgan prognozlash natijalarini talqin qilish uchun zarur kontekstni ta‘minlaydi.

Endi quyidagi 11-rasmda QChB soatlari bilan havodagi mayda dispers zarralar - PM2.5 va PM10 konsentratsiyasi o'rtasidagi oylar kesimidagi dinamik bog'liqlik aks ettirilgan. Grafikdan ko'rinishicha, maydan noyabrgacha bo'lgan davrda PM10 qiymatlari keskin oshib boradi va kuz oylarida eng yuqori darajaga yetadi (sentabr–noyabrda 92–110 mkg/m<sup>3</sup>). Bu jarayon QChB soatlari ortishi bilan mos ravishda kuchayadi. PM2.5 qiymatlari JSST chegarasi (5 mkg/m<sup>3</sup>) dan bir necha baravar yuqori bo'lib, bu QChBlarning atmosfera sifati va inson salomatligiga salbiy ta'sirini tasdiqlaydi. Ushbu grafik qum-chang bo'ronlarining aerozol yuklamasini oshiruvchi asosiy omillardan biri ekanini ko'rsatadi.



**11-rasm. 2023-yilda Nukus shahrida QChB soatlari, PM2.5 va PM10 konsentratsiyasining oylik taqsimoti.**

Qum-chang bo'ronlari davomiyligi ortishi bilan PM2.5 va PM10 konsentratsiyalarining yil davomida qanday o'zgarishi aniq ko'rsatilgan. Kuz oylarida bo'ronlar soni ko'payishi bilan havodagi mayda dispers zarrachalar darajasi ham keskin oshib, JSST me'yorlaridan bir necha barobar yuqori qiymatlar qayd etiladi. Bu jarayon atmosfera sifatining pasayishi, ko'rinishchanlikning yomonlashuvi va aholining nafas olish tizimiga salbiy ta'sirning kuchayishi bilan kechadi. Grafik QChBlar mintaqada aerozol yuklamasining asosiy drayverlaridan biri ekanini ilmiy jihatdan tasdiqlaydi.

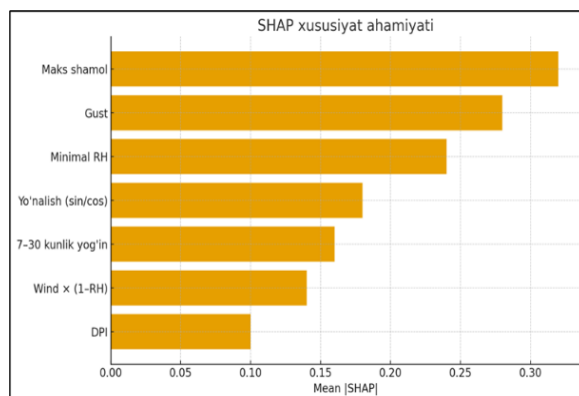
3-jadvalda 2014–2023 yillarda Mo'ynoq, Nukus va Qo'ng'iro't hududlarida qum-chang bo'ronlarining chastotasi, oylik intensivligi va davomiyligi solishtirilgan.

**3-jadval.**

**QChB chastotasi, intensivligi va davomiyligining hududlar bo'yicha taqqoslanishi.**

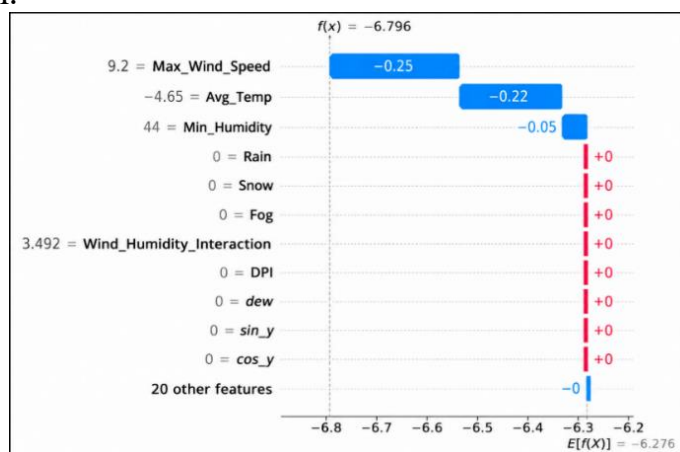
Hududlar (2014–2023 yillar)	O'rtacha QChB kunlari/ yil	Oylik intensivlik (%)	Maksimal davomiylik (soat)	Eslatma
Moynoq	17–49 kun (2014–2023)	10–30%, ba'zida 25–30%	Asosan 1–2 soat	Eng ko'p QChB, lekin davomiyligi qisqa
Nukus	3–13 kun	0–10%, ba'zida 7–10%	0–6 soat, 2018 yilda 6 soat	QChB kam, lekin ba'zida uzoq davom etadi
Qo'ng'iro't	7–18 kun	5–18%, ba'zida 15–18%	6–15 soat, 2018 yilda 15 soat	Davomiyligi eng uzun, intensivligi o'rtacha

Ma'lumotlarga ko'ra, eng yuqori QChB kunlari Mo'ynoqda kuzatiladi (yiliga 17–49 kun), biroq bo'ronlar davomiyligi nisbatan qisqa (odatda 1–2 soat). Qo'ng'irotda esa davomiylig eng yuqori bo'lib, ayrim yillarda 15 soatgacha yetadi. Nukusda bo'ronlar kamroq uchrasa-da, ba'zi yillarda intensivlikning oshishi qayd etiladi. Jadval hududlarning iqlimiy va deflyatsion xususiyatlari bo'ronlar parametrlarida muhim farq tug'dirishini ko'rsatadi. 12-rasmda SHAP tahlili asosida qum-chang bo'ronlarini bashoratlash modelida qo'llanilgan meteorologik omillarning nisbiy ahamiyati aks ettirilgan.



**12-rasm. QChB ehtimolini bashorat qilish uchun SHAP taxlivi ahamiyati.**

Natijalarga ko'ra, maksimal shamol tezligi va shamol zarbalari (gust) model prognoziga eng katta ta'sir ko'rsatgan asosiy omillar hisoblanadi. Shuningdek, havoning minimal nisbiy namligi, shamol yo'nalishi hamda yog'in ko'rsatkichlari qum-chang bo'ronlarining yuzaga kelish ehtimolini belgilovchi muhim omillar sifatida aniqlangan.



**13-rasm. SHAP Waterfall diagrammasi.**

Yuqoridagi 13-rasmida SHAP waterfall diagrammasi yordamida qum-chang bo'ronlarini bashoratlash modelining alohida kuzatuv uchun qaror shakllanishi ko'rsatilgan.

Natijalarga ko'ra, maksimal shamol tezligi, o'rtacha havo harorati va minimal nisbiy namlik prognoz natijasiga eng katta ta'sir ko'rsatgan omillar hisoblanadi, qolgan meteorologik va kalendar xususiyatlarning hissasi esa nisbatan kichik bo'lgan. Ushbu rasmda SHAP waterfall diagrammasi yordamida modelning alohida kuzatuv (konkret kun) bo'yicha bashorat qarori qanday shakllanishi izohlangan.

Diagrammada har bir omil model chiqishiga qo'shgan hissi bo'yicha ketma-ket ko'rsatiladi: maksimal shamol tezligi, o'rtacha harorat hamda minimal nisbiy namlik eng katta ulush bilan prognoz natijasini shakllantirgani kuzatiladi, qolgan meteorologik va kalendar xususiyatlar esa nisbatan kichik ta'sirga ega. Mazkur rasm modelni "qora quti" holatidan chiqarib, bashoratning sabablarini aniq ko'rsatib berishi bilan muhim ahamiyat kasb etadi. Ushbu yondashuvning ilmiy yangiligi shundaki, Orolbo'yi sharoitida qum-chang bo'ronlarini prognozlashda qo'llanilgan gibrid model natijalari SHAP asosida izohlanib, prognozga eng ko'p ta'sir etuvchi omillar ustuvorligi miqdoriy asosda aniqlangan. Bu esa O'zbekiston sharoitida QChB xavfini baholash va erta ogohlantirish tizimlarini takomillashtirishda qaror qabul qiluvchi tashkilotlar uchun (monitoring, profilaktika, ogohlantirish) tushunarli va ishonchli analitik asos yaratadi.

Xulosa qilib aytganda, ushbu bobda 2014–2024-yillar meteorologik ma'lumotlari asosida Orolbo'yida qum-chang bo'ronlarining shakllanishi va dinamikasiga ta'sir etuvchi asosiy iqlimiy omillar tahlil qilindi. Harorat oshishi, nisbiy namlik va yog'ingarchilikning kamayishi hamda shamol tezligining mavsumiy kuchayishi QChBlarning chastotasi va davomiyligi bilan bevosita bog'liq ekanini aniqlandi. Bo'ronli davrlarda PM2.5 va PM10 konsentratsiyalarining keskin oshishi QChBlarning aerazol yuklamasidagi yetakchi rolini tasdiqladi. Olingan natijalar QChBlarni bashoratlashda meteorologik omillarni kompleks integratsiyalash zarurligini asoslab berdi.

Dissertatsiyaning «**Qum-chang bo'ronlarini bashoratlash, baholash va joriy etish**» deb nomlangan to'rtinchi bobida qum-chang bo'ronlarini baholash va oldindan bashoratlash bo'yicha ishlab chiqilgan integratsiyalashgan yondashuvning amaliy natijalari bayon etilgan. Bobda turli manbalardan olingan meteorologik va monitoring ma'lumotlarini tasniflash asosida SARIMA va XGBoost modellariga tayangan holda olingan bashorat natijalari tahlil qilinib, ularning aniqligi va ishonchliligi baholangan. Shuningdek, ishlab chiqilgan bashoratlash algoritmlarini avtomatlashtirish, foydalanuvchiga yetkazish hamda ekologik monitoring va erta ogohlantirish tizimlariga joriy etish imkoniyatlari asoslab berilgan. Quyidagi 4-jadvalda qum-chang bo'ronlarini (QChB) bashoratlashda foydalanilgan ma'lumotlar to'plamining qamrovi va bo'linmalari statistikasi keltirilgan. Ma'lumotlar 2014–2025-yillarni qamrab olib, train, validation, test va out-of-time bo'limlarga ajratilgan. Har bir bo'limda QChB kunlarining ulushi 3,6–4,1 % oralig'ida bo'lib, sinflar nisbati 1:23–1:27 diapazonda saqlangan, bu esa modellarni barqaror o'qitish va baholash imkonini ta'minlaydi. Jadval ma'lumotlaridan ko'rinib turibdiki, qum-chang bo'ronlari hodisalari umumiy kuzatuvlar soniga nisbatan kam uchraydi, bu esa ma'lumotlar to'plamida sinflar muvozanatsizligini yuzaga keltiradi. Shu bois modellashtirish jarayonida ma'lumotlarni vaqt bo'yicha to'g'ri ajratish hamda train, validation va test bo'limlarida QChB ulushini nisbatan barqaror saqlashga alohida e'tibor qaratildi.

## Ma'lumot qamrovi va bo'linmalar statistikasi

Bo'linma	Yillar	Kunlar soni	QChB_1 kunlari	QChB chastotasi (%)	Sinf ulushi (1:0)
Train	2014–2019	2192	82	3.7	1: 25.7
Validation	2020–2021	731	30	4.1	1: 23.4
Test (final)	2022–2023	730	28	3.8	1: 25.1
Out-of-time (ops)*	2024–2025	690†	25	3.6	1: 26.8

Out-of-time ma'lumotlar esa ishlab chiqilgan modellarni real sharoitlarda sinovdan o'tkazish va ularning umumlashuv qobiliyatini baholash uchun xizmat qildi.

## Kalibrlash ko'rsatkichlari (test va out-of-time)

Segment	ECE (↓)	Brier (↓)	Reliability (↓)	Resolution (↑)	PR-AUC (↑)
Test (pre-cal)	0.078	0.087	0.056	0.031	0.41
Test (post-cal)	0.028	0.081	0.014	0.034	0.41
Ops (pre-cal)	0.092	0.094	0.067	0.029	0.39
Ops (post-cal)	0.034	0.088	0.018	0.031	0.40

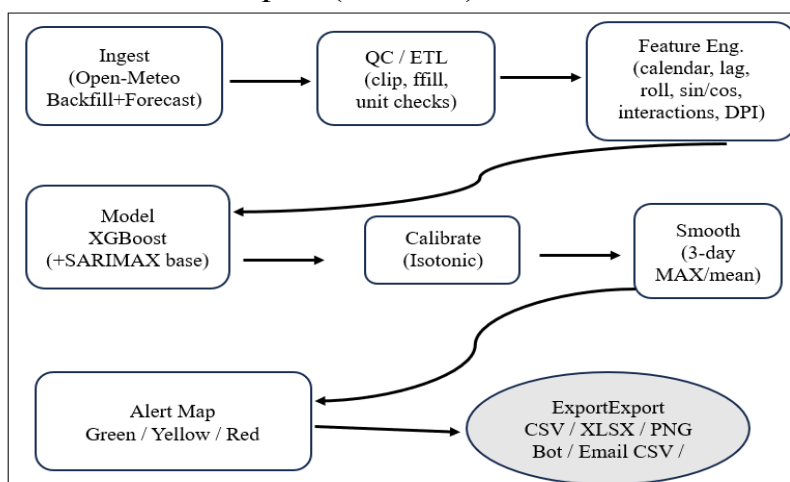
Yuqoridagi 5-jadvalda qum-chang bo'ronlarini bashoratlash modeli uchun test va out-of-time (ops) ma'lumotlarida kalibrlash ko'rsatkichlari keltirilgan. Jadvalda kalibrlashdan oldingi va keyingi holatlar bo'yicha modelning ishonchligi hamda bashorat sifati taqqoslab baholangan.

Jadval ma'lumotlaridan ko'rinib turibdiki, kalibrlashdan so'ng test segmentida ECE ko'rsatkichi 0,078 dan 0,028 gacha, Reliability 0,056 dan 0,014 gacha, Brier esa 0,087 dan 0,081 gacha kamaygan. Xuddi shuningdek, out-of-time (ops) ma'lumotlarida ECE 0,092 dan 0,034 gacha, Reliability 0,067 dan 0,018 gacha, Brier esa 0,094 dan 0,088 gacha pasaygan. Shu bilan birga, PR-AUC qiymatlari test (0,41) va ops (0,39–0,40) segmentlarida deyarli o'zgarmagan hamda Resolution ko'rsatkichining barqaror saqlanishi modelning ajratish qobiliyati pasaymaganini tasdiqlaydi. Quyidagi 6-jadvalda qum-chang bo'ronlarini bashoratlashda qo'llanilgan SARIMA, XGBoost va ularning gibrid modeli uchun validatsiya metrikalarining o'rtacha qiymatlari keltirilgan. Jadval modellar samaradorligini aniqlik va xatolik ko'rsatkichlari asosida taqqoslash imkonini beradi.

**Qum-chang bo‘ronlarini bashoratlovchi modellar uchun validatsiya metrikalari (o‘rtacha qiymatlar).**

Modellar	Accuracy	ROC_AUC	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>
SARIMA	0.946	0.74	0.240	0.182	0.28
XGBoost	0.957	0.86	0.205	0.154	0.41
<b>SARIMA + XGBoost (gibrid)</b>	<b>0.963</b>	<b>0.89</b>	<b>0.188</b>	<b>0.136</b>	<b>0.49</b>

Jadval ma’lumotlariga ko‘ra, gibrid SARIMA+XGBoost modeli Accuracy = 0,963, ROC-AUC = 0,89, RMSE = 0,188, MAE = 0,136 va R<sup>2</sup> = 0,49 ko‘rsatkichlari bilan alohida SARIMA va XGBoost modellariga nisbatan yuqori natija ko‘rsatgan. Xususan, SARIMA modelida ROC-AUC 0,74, R<sup>2</sup> 0,28, XGBoost modelida esa ROC-AUC 0,86, R<sup>2</sup> 0,41 bo‘lib, gibrid yondashuv bashorat aniqligi va model izohlanuvchanligini sezilarli darajada oshirganini ko‘rsatadi. Shuningdek, qum-chang bo‘ronlarini bashoratlash jarayonini avtomatlashtirish va amaliyotga joriy etish maqsadida statistik va sun‘iy intellekt yondashuvlarini birlashtiruvchi gibrid pipeline arxitekturasi ishlab chiqildi (14-rasm).



**14-rasm. Qum-chang bo‘ronlarini prognozlashning gibrid (SARIMAX–XGBoost) pipeline arxitekturasi**

Rasmda meteorologik ma’lumotlarni yig‘ish va tekshirish, xususiyatlar hosil qilish, SARIMAX–XGBoost asosidagi modellashtirish, ehtimollarni kalibrlash hamda natijalarni silliqlash bosqichlarini o‘z ichiga olgan prognozlash pipeline’i ko‘rsatilgan. Yakuniy natijalar xavf darajalariga ajratilib, xaritalar va avtomatik ogohlantirishlar (bot va elektron pochta) orqali foydalanuvchilarga yetkaziladi.

7-jadvalda qum-chang bo‘ronlarini bashoratlash tizimini avtomatlashtirishda qo‘llanishi mumkin bo‘lgan asosiy texnik variantlar, ularning imkoniyatlari va cheklovlari taqqoslab keltirilgan. Colab muhiti esa asosan demo, test va favqulodda zaxira holatlari uchun mos bo‘lib, doimiy ekspluatatsiya uchun cheklangan

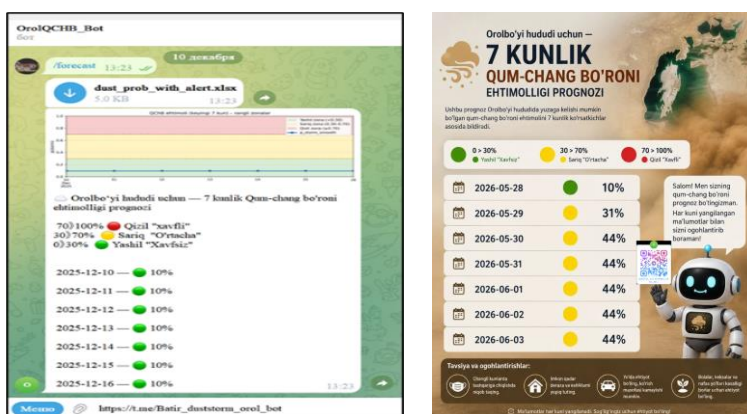
imkoniyatlarga ega. Ushbu taqqoslash avtomatlashtirish yechimini tanlashda amaliy qaror qabul qilishga xizmat qiladi.

### 7-Jadval.

#### Avtomatlashtirish variantlari: imkoniyat va cheklovlar

Variant	Rejalashtirish	Xavfsizlik	Loglar	Resurs nazorati	Qo‘llash ssenariysi
GitHub Actions	Cron (YAML)	Secrets (encrypted)	Job log (history)	Cloud (runner)	Prod uchun qulay, arzon
VPS + Docker	cron/systemd	.env + secrets	File-log + rotate	To‘liq nazorat	Prod (barqaror, moslashuvchan)
Colab (fallback)	Qo‘lda	N/A	Notebook output	Cheklangan	Demo/test, rezerv

Jadvaldan ko‘rinib turibdiki, GitHub Actions varianti kam xarajatli va ishlab chiqarish muhiti uchun qulay bo‘lsa, VPS + Docker yechimi yuqori barqarorlik va moslashuvchanlikni ta‘minlaydi. Endi quyidagi 15-rasmda qum-chang bo‘ronlarini 7 kun oldindan bashoratlovchi Telegram-bot (@Batir\_duststorm\_oro\_bot) interfeysi ko‘rsatilgan bo‘lib, unda Orolbo‘yi hududi uchun prognoz natijalari xavf darajalari bo‘yicha avtomatik baholanib, foydalanuvchiga grafik va foiz ko‘rinishida yetkaziladi.



### 15-rasm. Qum-chang bo‘ronlarini 7 kun oldindan bashoratlovchi Telegram-bot interfeysi

Bot orqali taqdim etilgan natijalar kunlar kesimida rangli indikatorlar yordamida vizuallashtirilib, xavfsiz, o‘rtacha va yuqori xavf toifalari aniq ajratib ko‘rsatiladi. Shuningdek, prognoz ma‘lumotlari elektron jadval (Excel) formatida yuklab olish imkoniyati bilan ta‘minlangan. Ushbu interfeys foydalanuvchilarga qum-chang bo‘ronlari xavfini tezkor baholash, oldindan ogohlantirish choralari ko‘rish hamda amaliy qarorlar qabul qilish jarayonini soddalashtirishga xizmat qiladi. Ushbu bobda qum-chang bo‘ronlarini bashoratlash, baholash va amaliyotga joriy etish bo‘yicha olingan asosiy natijalar umumlashtirilgan. Orolbo‘yi hududi misolida statistik va sun‘iy intellektga asoslangan gibriddan yordamida qum-chang bo‘ronlarini 7 kun oldindan prognozlash imkoniyati yaratildi. Bashorat natijalarining aniqligi va ishonchliligi turli statistik mezonlar asosida baholangan.

Shuningdek, ishlab chiqilgan modellar avtomatlashtirilgan tizimga integratsiyalanib, Telegram-bot orqali foydalanuvchilarga yetkazish mexanizmi yo'lga qo'yilgan. Olingan natijalar ekologik monitoring va erta ogohlantirish tizimlarini takomillashtirishda amaliy ahamiyatga ega ekanligi isbotlangan.

## XULOSALAR

Dissertatsiya ishida **“Iqlim o'zgarishi sharoitida Orolbo'yi hududida qum-chang bo'ronlarining davomiyligini bashoratlash”** mavzusi bo'yicha olib borilgan ilmiy-tadqiqot ishlari natijalari quyidagi xulosalarni chiqarish imkonini berdi:

1. Orolbo'yi hududida qum–chang bo'ronlarini oldindan qisqa muddatli bashorat qilish modeli uchun maksimal shamol tezligi, so'nggi kuzatilgan yog'ingarchilik miqdori, kutilayotgan ob-havo sharoitlari hamda fasliy o'zgaruvchanliklar asosiy meteorologik omillar sifatida tanlab olindi. Modellash natijalari ushbu omillar qum–chang bo'ronlarining shakllanishi va intensivligiga sezilarli ta'sir ko'rsatishini tasdiqladi. Olingan natijalar asosida hududga xos ilmiy yondashuvlar tizimlashtirilib, mavjud metodologik muammolar va tadqiqot bo'shliqlari aniqlanib, ishning ilmiy-nazariy asoslari shakllantirilgan.

2. Natijalarga ko'ra maksimal shamol tezligi va shamol zarbalari (gust) qum–chang bo'ronlari prognoziga eng katta ta'sir ko'rsatuvchi omillar sifatida aniqlandi. SHAP tahlili minimal nisbiy namlik, o'rtacha harorat va yog'in miqdori ham muhim rol o'ynashini ko'rsatdi. Olingan natijalar asosida xavf darajasini baholash shkalasi ishlab chiqildi: past xavf (0–30%), o'rtacha xavf (30–60%), yuqori xavf (60–80%) va juda yuqori xavf (80–100%). 60% dan yuqori qiymatlar Orolbo'yi hududida chang ko'tarilishi va qum–chang bo'roni yuzaga kelishining yuqori ehtimolini bildirishi aniqlandi. Bu yondashuv prognoz natijalarini amaliy talqinda qo'llash va erta ogohlantirish tizimlari uchun ishonchli asos yaratgan.

3. 2014–2023 yillar bo'yicha hududiy tahlil natijalariga ko'ra qum–chang bo'ronlari eng ko'p Moynoq hududida kuzatilgani, Qo'ng'irotda esa ularning davomiyligi nisbatan uzoq ekanligi, Nukusda esa hodisalar nisbatan kam uchrashi aniqlangan. Oylik intensivlik va davomiylilik ko'rsatkichlari hududlar kesimida sezilarli farqlanishi qayd etilib, Orolbo'yi hududida QChBlarning fazoviy taqsimoti notekis ekanligi aniqlangan.

4. Ma'lumotlar 2014–2025 yillarni qamrab olgan holda train, validation, test va out-of-time bo'linmalarga ajratilib, natijalar barcha bo'linmalarda qum–chang bo'ronlari chastotasi 3.6–4.1% oraliq'ida barqaror saqlanganini, sinflar nisbati esa 1:23–1:27 diapazonda muvozanatlanganligini ko'rsatdi. Bu esa ma'lumotlar to'plamining vaqt bo'yicha izchil taqsimlanganini va modelni o'qitish hamda umumlashtirish uchun ishonchli asos yaratilganini tasdiqlagan.

5. SHAP tahlili yordamida prognoz natijalariga ta'sir etuvchi meteorologik omillarning nisbiy hissasi aniqlanib, model natijalarining izohlanishi ta'minlandi. Bu esa bashorat natijalarini amaliy qaror qabul qilish jarayonlarida qo'llash imkoniyatlarini kengaytirgan.

6. Olingan prognoz natijalari tahlili asosida ishlab chiqilgan yondashuvning aniqligi 78,8 % dan 93 % gacha yetishi dalillandi, bu esa qum–chang bo‘ronlarini ishonchli bashorat qilish imkoniyatini tasdiqladi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.18/2025.27.12.T.01.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЁНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ  
ИНСТИТУТЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ПРИРОДООХРАННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ**

---

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ОКРУЖАЮЩЕЙ  
СРЕДЫ И ПРИРОДООХРАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**ХАЛМУРАТОВ БАТИР ХАЛБАИ УЛИ**

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПЕСЧАНО-  
ПЫЛЬНЫХ БУРЬ В РЕГИОНЕ ПРИАРАЛЬЯ В УСЛОВИЯХ  
ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА**

**11.00.05 – Охрана окружающей среды и рациональное использование природных  
ресурсов**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)  
ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**

**Ташкент – 2026**

Тема диссертации на соискание учёной степени доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан под номером № B2025.3.PhD/T414.

Диссертация выполнена в Научно-исследовательском институте окружающей среды и природоохранных технологий.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице по адресу [ecoilm.uz](http://ecoilm.uz), [uznature.uz](http://uznature.uz) и на информационно-образовательном портале «ZiyoNet» по адресу [www.ziyo.net](http://www.ziyo.net).

**Научный руководитель:**

**Пулатов Бахтиёр Алимович**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Шарипов Шайкат Мухамаджанович**  
доктор географических наук, профессор

**Гаффоров Хусен Ширинович**  
доктор философии (PhD) по техническим наукам, доцент

**Ведущая организация:**

Каракалпакский научно-исследовательский институт естественных наук Каракалпакского отделения Академии наук Республики Узбекистан

Защита диссертации состоится «15» 06 2026 года в 15<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета PhD.18/2025.27.12.T.01.01 при Научно-исследовательском институте окружающей среды и природоохранных технологий. Адрес: 111104, Ташкентская область, Ташкентский район, пос. Дархан, улица Чимкент йули, 2. Контакты: тел.: (77) 782-27-17; e-mail: [eco\\_ilm@uzmail.uz](mailto:eco_ilm@uzmail.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Научно-исследовательского института окружающей среды и природоохранных технологий. Адрес: 111104, Ташкентская область, Ташкентский район, пос. Дархан, улица Чимкент йули, 2. Контакты: тел.: (77) 782-27-17; e-mail: [eco\\_ilm@uzmail.uz](mailto:eco_ilm@uzmail.uz).

Автореферат диссертации разослан «08» 06 2026 года.

(реестр протокола рассылки № 26/02 от «08» 06 2026 года)

**Л. Н. Самиев**  
Заместитель председателя Научного совета, доктор технических наук, доцент.

**О. Г. Эргашев**  
Учредитель секретарь Научного совета, доктор философии (PhD) по техническим наукам, с.н.с.

**Ш. А. Муратов**  
Председатель научного семинара при Научном совете, доктор технических наук, профессор.

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В условиях глобального изменения климата ведущее место в мире занимает научное изучение усиления экологических рисков, в частности возникновения и длительности песчано-пыльных бурь, а также применение современных методов мониторинга и моделирования для их прогнозирования. Учитывая, что на мировом уровне усиление засух, сокращение водных ресурсов и интенсификация процессов опустынивания, вызванные изменением климата, оказывают прямое влияние на частоту повторяемости и продолжительность песчано-пыльных бурь, глубокий анализ данных процессов в регионе Приаралья и прогнозирование их длительности являются одними из актуальных научных задач. Это обуславливает необходимость внедрения результатов данного исследования в практику в целях снижения экологических рисков, охраны здоровья населения и обеспечения устойчивого регионального развития. В этом аспекте важное значение имеет использование современных научных подходов, математических моделей и информационных технологий при определении и прогнозировании продолжительности песчано-пыльных бурь.

В мире ведутся научно-исследовательские работы, направленные на научное изучение механизмов формирования, распространения и длительности песчано-пыльных бурь в целях снижения связанных с ними экологических рисков, охраны здоровья населения и обеспечения устойчивого развития в условиях изменения климата. В данном направлении особое внимание уделяется формированию высокоточных прогнозов для раннего обнаружения и прогнозирования песчано-пыльных бурь посредством интеграции данных метеорологических наблюдений, спутниковых данных, а также статистических моделей и методов искусственного интеллекта. В частности, многочисленными исследованиями доказана научно-практическая эффективность применения анализа временных рядов, алгоритмов машинного обучения и гибридных подходов при оценке продолжительности и интенсивности песчано-пыльных бурь. На основе данных подходов особое внимание акцентируется на вопросах создания прогностических систем, направленных на минимизацию экологических и социально-экономических последствий песчано-пыльных бурь, а также на их интеграции в системы регионального мониторинга и раннего оповещения.

В нашей республике осуществляются широкомасштабные меры по проведению научно-практических исследований и внедрению их результатов в практику в целях снижения экологических рисков, связанных с песчано-пыльными бурями в условиях изменения климата, а также охраны здоровья населения. В частности, в Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы определены задачи по обеспечению экологической безопасности, смягчению негативных последствий изменения климата, улучшению качества атмосферного воздуха и охране здоровья населения. В реализации данных задач важное значение имеет, в частности, оценка частоты повторяемости и

продолжительности возникновения песчано-пыльных бурь в регионе Приаралья на основе данных наблюдений, а также их анализ во взаимосвязи с основными метеорологическими факторами. Кроме того, актуальным является прогнозирование этих процессов с помощью современных средств мониторинга, статистических моделей и методов искусственного интеллекта, а также внедрение полученных результатов в системы экологического мониторинга и раннего оповещения.

Данная диссертационная работа в определенной степени служит реализации задач, определенных в Указе Президента Республики Узбекистан № УП-60 от 28 января 2022 года «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы», Постановлении № ПП-338 от 24 сентября 2024 года «О первоочередных мерах по борьбе с пыльными бурями и улучшению качества атмосферного воздуха», а также в других нормативно-правовых актах, направленных на охрану окружающей среды, смягчение последствий изменения климата и обеспечение экологической безопасности.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Исследования, проведенные в рамках диссертационной работы, полностью соответствуют приоритетному направлению развития науки и технологий республики «Охрана окружающей среды, экологическая безопасность и адаптация к изменению климата».

#### **Степень изученности проблемы.**

Вопросы формирования пыльно-песчаных бурь, источников их эмиссии, процессов переноса в атмосфере, их связи с метеорологическими и синоптическими факторами, влияния на климатическую систему, а также их мониторинга, оценки и прогнозирования являются объектом многочисленных научных исследований. Фундаментальные и прикладные исследования в данном направлении отражены в работах Ж.Просперо, У.Ванга, Н.Махоуэлд, Дж.Кока, С.Теген, Х.Шепански, С.Перес, С.Пандо, П.Книпперца, М.Тодда, Р.Миллера, И.Соколик, С.Бауэра, А.Силвы, С.Соломос, А.Абульгазима, Ч.Спиру, А.Бенедетти, Дж.Бальдасано, М.Бороухани, С.Пурхашеми, С.Ставроса, М.Санисалеса, М.Шульца, Й.Шао, Д.Джакоба, а также Б.Нишанова, Н.Рахматовой, Л.Шардаковой, А.Беликова, А.Расулова, Б.Эшчанова, Н.Абдуллаева, Ф.Хикматова, Б.Пулатова, З.Алимова, З.Маматовой, Б.Тлеумуротовой, Б.Исламова и других учёных.

В указанных исследованиях подробно изучены природные и антропогенные факторы, влияющие на возникновение пыльно-песчаных бурь, физико-химические свойства пылевых аэрозолей, их взаимодействие с атмосферной циркуляцией, механизмы дальнего переноса, а также экологические и социально-экономические последствия. Кроме того, разработаны различные подходы к обнаружению, мониторингу и прогнозированию пыльно-песчаных бурь с использованием спутниковых данных, технологий дистанционного зондирования, геоинформационных систем и методов математического моделирования.

Особое внимание уделено оценке интенсивности, повторяемости и продолжительности пыльно-песчаных бурь, их влиянию на качество воздуха, изменение климата, экосистемы и здоровье населения, а также разработке и совершенствованию глобальных и региональных прогнозных моделей. В результате сформированы научно-методические основы наблюдения, оценки и прогнозирования пыльно-песчаных бурь и разработан ряд моделей и технологий, применяемых на практике.

Вместе с тем, недостаточно изученными остаются вопросы комплексной оценки продолжительности пыльно-песчаных бурь во взаимосвязи с метеорологическими факторами, разработки гибридных прогнозных моделей на основе технологий искусственного интеллекта и машинного обучения, повышения точности прогнозных результатов, а также их интеграции в системы экологического мониторинга и раннего предупреждения. Данное обстоятельство определяет необходимость проведения дополнительных научных исследований в данном направлении.

#### **Связь темы диссертации с планами научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.**

Диссертационное исследование выполнено в соответствии с планами научно-исследовательских работ Научно-исследовательского института окружающей среды и природоохранных технологий в рамках целевого прикладного проекта на 2024–2026 годы на тему «Разработка модели прогнозирования условий формирования и регионов распространения пыльных бурь для Приаральского региона».

**Цель исследования** заключается в выявлении особенностей формирования и продолжительности песчано-пыльных бурь в регионе Приаралья во взаимосвязи с определяющими метеорологическими факторами, их краткосрочном и долгосрочном прогнозировании на основе современных статистических методов и моделей искусственного интеллекта, а также в научном обосновании применения полученных результатов в системах экологического мониторинга и раннего оповещения.

#### **Задачи исследования:**

проанализировать существующую научную литературу и ранее выполненные научно-исследовательские работы по наблюдению, оценке и прогнозированию песчано-пыльных бурь;

определить основные метеорологические факторы, влияющие на формирование песчано-пыльных бурь в регионе Приаралья;

осуществить моделирование с использованием гибридного подхода на основе статистических методов и искусственного интеллекта с целью прогнозирования продолжительности песчано-пыльных бурь;

теоретически и экспериментально обосновать основные параметры и эффективность работы примененного подхода к моделированию;

оценить надежность и точность результатов прогнозирования на основе различных статистических критериев.

**Объектом исследования** являются песчано-пыльные бури, возникающие в регионе Приаралья, а также метеорологические процессы, определяющие их формирование и продолжительность.

**Предметом исследования** служат статистические взаимосвязи между метеорологическими факторами, определяющими возникновение явления песчано-пыльных бурь в регионе Приаралья, математические модели, примененные для их прогнозирования и временные закономерности изменения результатов прогноза.

**Методы исследования.** В процессе исследования использовались методы обработки и анализа данных метеорологических наблюдений, принципы математического и статистического анализа, моделирование на основе временных рядов, методы регрессионного и корреляционного анализа, статистические подходы и методы искусственного интеллекта, применяемые при прогнозировании песчано-пыльных бурь, критерии оценки результатов прогноза (MSE, MAE, RMSE,  $R^2$ ), а также методические подходы, определенные в существующих нормативно-правовых актах.

**Научная новизна исследования заключается в следующем:**

разработана полностью автоматизированная концептуальная модель краткосрочного прогнозирования песчано-пыльных бурь в регионе Приаралья, учитывающая статистический анализ, обработку метеорологических данных и их оперативную передачу в режиме, близком к реальному времени;

разработан метод расчета для определения условий возникновения песчано-пыльных бурь на основе интеграции максимальной скорости ветра, средней температуры воздуха, минимальной относительной влажности и основных компонент посредством метода PCA со статистическими моделями и моделями машинного обучения;

на основе интеграции моделей SARIMA и XGBoost для прогнозирования песчано-пыльных бурь в регионе Приаралья разработана гибридная прогностическая модель, и доказано повышение точности прогноза модели на 78,8 - 93%, за счет снижения ESE с 0,078 до 0,028 на тестовом сегменте и с 0,092 до 0,034 на вневременном out-of-time сегменте;

разработана научно обоснованная и ориентированная на пользователей автоматизированная информационно-программная система (телеграм-бот @Batir\_dusstorm\_orol\_bot), позволяющая осуществлять краткосрочное прогнозирование явления песчано-пыльных бурь в условиях региона Приаралья с заблаговременностью до 7 дней.

**Практические результаты исследования заключаются в следующем:**

создана возможность использования автоматизированной информационно-программной системы для краткосрочного упреждающего прогнозирования песчано-пыльных бурь в условиях региона Приаралья;

доказана возможность использования выявленных основных метеорологических факторов и степени их влияния в процессах экологического мониторинга и оценки рисков;

обоснована возможность применения разработанных моделей в практической деятельности организаций в сфере гидрометеорологии и экологии, при этом точность результатов примененного в исследовании прогностического подхода составляет 78,8%.

**Достоверность результатов исследования** обосновывается проведением изысканий с использованием современных методов статистического анализа и моделирования, взаимной адекватностью результатов теоретического анализа и практических наблюдений, расчетами, выполненными на основе многолетних метеорологических данных, а также возможностью практического применения результатов моделирования, направленного на прогнозирование песчано-пыльных бурь.

#### **Научная и практическая значимость результатов исследования.**

**Научная значимость исследования** заключается в теоретическом обосновании подходов, примененных при анализе динамики метеорологических процессов, связанных с песчано-пыльными бурями, и их моделировании в специфических климатических условиях региона Приаралья.

**Практическая значимость результатов исследования** заключается в возможности использования полученных результатов при краткосрочном прогнозировании песчано-пыльных бурь, в процессах экологического мониторинга и оценки рисков, а также в практической деятельности организаций в сфере гидрометеорологии и экологии.

**Внедрение результатов исследования.** На основе результатов прогнозирования продолжительности песчано-пыльных бурь в Приаралье в условиях изменения климата:

полностью автоматизированная концептуальная модель краткосрочного прогнозирования песчано-пыльных бурь, разработанная для региона Приаралья с учетом оперативной передачи данных в режиме, близком к реальному времени, внедрена в деятельность Министерства экологии, охраны окружающей среды и изменения климата Республики Каракалпакстан (справка № 02/08-182-2709 от 21 августа 2025 года). Практическое использование модели позволило повысить точность и оперативность раннего обнаружения и краткосрочного прогнозирования песчано-пыльных бурь в регионе Приаралья;

вычислительный метод, основанный на интеграции статистических моделей и алгоритмов машинного обучения с использованием показателей максимальной скорости ветра, средней температуры воздуха, минимальной относительной влажности, а также главных компонент, определенных методом РСА, внедрен в практику Кунградского и Муйнакского районных отделов Министерства экологии, охраны окружающей среды и изменения климата Республики Каракалпакстан (справка № 02/08-182-2709 от 21 августа 2025 года). Внедрение данного метода обеспечило повышение точности упреждающего прогнозирования песчано-пыльных бурь, а также создало возможность оперативного использования надежной прогностической системы специалистами отрасли в масштабах региона;

гибридная прогностическая модель, разработанная на основе интеграции алгоритмов SARIMA и XGBoost для прогнозирования песчано-пыльных бурь в Приаралье, внедрена в деятельность Министерства экологии, охраны окружающей среды и изменения климата Республики Каракалпакстан (справка № 02/08-182-2709 от 21 августа 2025 года). Использование данной модели обеспечило повышение точности прогнозных значений до 78,8-93%, что позволило существенно повысить эффективность упреждающего обнаружения опасных атмосферных явлений, обеспечить надежную оценку степени их экологической опасности и оптимизировать процесс принятия управленческих решений;

автоматизированная информационно-программная система (телеграм-бот @Batir\_dusstorm\_orol\_bot), предназначенная для оперативного краткосрочного прогнозирования песчано-пыльных бурь в условиях Приаралья с заблаговременностью до 7 суток, внедрена в практику Министерства экологии, охраны окружающей среды и изменения климата Республики Каракалпакстан (справка № 02/08-182-2709 от 21 августа 2025 года). Внедрение данной системы обеспечило возможность среднесрочного планирования защитных мероприятий, оперативного и надежного информирования населения и профильных специалистов, а также своевременного принятия превентивных мер, направленных на минимизацию рисков возникновения чрезвычайных ситуаций.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на 2 международных и 2 республиканских научно-практических конференциях.

**Публикация результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 6 статей в научных изданиях, включенных в перечень Высшей аттестационной комиссии Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных исследований (из них 5 - в республиканских и 2 - в зарубежном научном журнале), а также тезисы докладов.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения (общих выводов), списка использованной литературы и приложений. Общий объем текстовой части диссертации составляет 120 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении диссертации** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы основная цель и задачи проведенного исследования, охарактеризованы его объект и предмет. Изложено соответствие работы приоритетным направлениям развития науки и технологий республики, раскрыты научная новизна и практические результаты исследования.

**В первой главе** диссертации, озаглавленной «Формирование, экологические последствия и анализ исследований песчано-пыльных бурь в

Приаралье», освещены процессы формирования песчано-пыльных бурь в регионе Приаралья, их экологическая опасность и негативные последствия. Также представлен анализ теоретических и практических исследований, существующих моделей оценки и прогнозирования, а также научных подходов в данном направлении. В частности, на основе научных источников приводится анализ физико-географических и метеорологических факторов, влияющих на формирование явлений песчано-пыльных бурь в регионе Приаралья, а также их экологической и социально-экономической опасности. В главе пустыня Аралкум, образовавшаяся в результате высыхания Аральского моря, рассматривается как основной дефляционный очаг региона, а свойства ее поверхности оцениваются с точки зрения влияния на подъем песчаных и пылевых частиц. Проанализирована взаимосвязь ветрового режима, влажности поверхности, состояния подстилающей поверхности, вегетационных индексов, а также суточных и сезонных атмосферных процессов с песчано-пыльными бурями.

Обобщены закономерности суточных и сезонных изменений песчано-пыльных бурь, наблюдаемых в регионе, и на основе научной литературы освещены особенности их распределения в течение года. Также аналитически рассмотрено влияние геоморфологических и аэродинамических условий плато Устюрт и северной части Каракалпакстана на скорость ветра и процессы подъема пыли.

Скорость ветра, дальность видимости и коэффициент оптического ослабления являются основными метеорологическими критериями при оценке песчано-пыльных бурь (далее - ППБ), и данные параметры имеют важное научно-практическое значение при определении интенсивности, уровня опасности и условий распространения бури. В таблице 1 ниже приведены основные показатели, используемые для классификации песчано-пыльных бурь, и их операционная интерпретация.

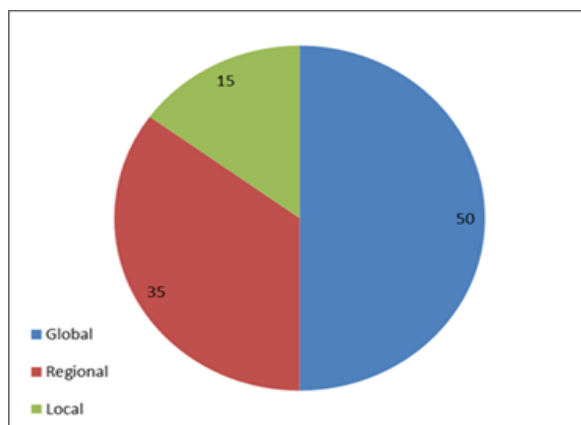
**Таблица 1.**

**Практические критерии идентификации песчано-пыльных бурь**

Состояние	Ветер на высоте 10 м (средний/порывистый)	Дальность видимости, V (км)	$\sigma_{ext} \approx 3,9/V$ (км <sup>-1</sup> )	Примечание / операционная интерпретация
Поземок / пылевая извесь	Средняя скорость < 12–15 м/с, порывы < 18–20 м/с	1–3	≈ 1,3 – 3,9	Дальняя адвекция; слабый локальный подъем
ППБ (пыльная буря)	Средняя скорость ветра ≥ 15–18 м/с или порывы ветра ≥ 20–22 м/с	≤ 1	≥ 3,9	Активный локальный подъем; высокий транспортный риск
Сильная ППБ	Средняя скорость ветра ≥ 20 м/с или порывы ветра ≥ 25 м/с	≤ 0,5	≥ 7,8	Очень низкая видимость; необходимы экстренные меры

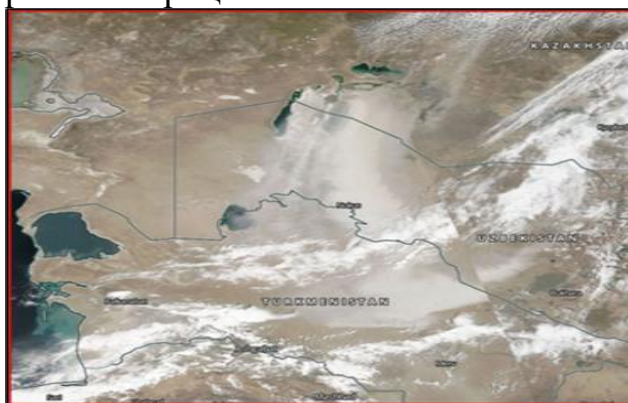
Приведенные в таблице пороговые значения представляют собой типичное руководство, сформированное на основе практических наблюдений, и были определены с помощью соотношения Кошмидера  $V \approx 3,9 / \sigma_{ext}$ . При различиях в ветровом режиме, влажности поверхности региона и типах используемых датчиков данные границы были соответствующим образом откалиброваны. Итоговая оценка осуществлялась с учетом синоптических условий, показателей аэрозолей (PM), сезонности и уровня опасности.

В качестве важной части главы систематически изучено текущее состояние глобальных, региональных и локальных научных исследований по прогнозированию песчано-пыльных бурь, применяемые методы и их применимость к условиям Приаралья. Современные подходы к раннему оповещению о ППБ разделяются на три основные группы: динамические модели (WRF-Chem, CAMx), статистико-вероятностные методы (SARIMA/SARIMAX, логистическая регрессия и градиентный бустинг), а также подходы, основанные на данных (data driven), опирающиеся на дистанционное зондирование и реанализ ERA 5. Интеграция спутниковых показателей (AOD, NDVI/LAI, LST) и наземного мониторинга (PM10/PM2.5) указывается как важный фактор при определении пространственно-временной динамики ППБ. Отмечается многоаспектность социально-экономического и экологического воздействия бурь, и обосновываются такие последствия, как риски для транспорта и авиации, запыление энергетических сетей, снижение урожайности сельскохозяйственных культур, деградация почв, засоление водоемов и рост респираторно-кардиоваскулярных заболеваний среди населения. Подчеркивается, что в условиях Приаралья Аралкум, солончаковые зоны высохших дельт и дефляционные зоны усиливают перенос пыли на дальние расстояния. В разделе проанализированы научные труды таких зарубежных ученых, как Т.Теген, П.Книппертц, М.Тодд, И.Ванг, М.Шао, И.Шао, Г.Стенчиков, Ванг Тао и др., а также региональных и отечественных исследователей Н.Равшанова, Б.Нишонова, А.Расулова, Б.Эшчанова, А.Ахмедовой, З.Маматовой, Н.Абдуллаева, Б.Тлеумуратовой, АюБеликова, Рахматовой и других. На основе данных исследований систематически обобщены научные источники, связанные с изменениями в экологической системе Приаралья, гидрометеорологическими процессами, а также с эмиссией песка и пыли. Со ссылкой на данные международных организаций (WHO, UNEP, FAO, Всемирный банк) указано, что ППБ наносят ежегодный экономический ущерб в размере до 1-3% от ВВП. В конце раздела приведена диаграмма распределения доли исследований на глобальном, региональном и локальном уровнях (рисунок 1), которая наглядно демонстрирует распределение существующих научных исследований по масштабу.



**Рисунок 1. Распределение научной литературы по исследованиям песчано-пыльных бурь на глобальном, региональном и локальном уровнях.**

При этом на долю исследований глобального уровня приходится 50%, регионального - 35% и локального - всего 15%. Это свидетельствует о том, что основная часть научных исследований по песчано-пыльным бурям направлена на изучение общеглобальных климатических процессов, динамики атмосферы и трансграничных аэрозольных потоков. Исследования регионального уровня, будучи ограниченными определенным географическим регионом, тем не менее не могут полностью охватить специфические особенности конкретной местности. Крайне низкая доля исследований локального уровня (15%) по прогнозированию песчано-пыльных бурь указывает на наличие серьезного научного пробела для таких экологически уязвимых зон, как регион Приаралья. Это обусловлено тем, что формирование и продолжительность песчано-пыльных бурь тесно связаны с такими факторами, как местный рельеф, структура высохшего дна моря, почвенно-водный режим, степень деградации ландшафта и локальный ветровой режим. В глобальных или региональных моделях данные факторы обычно учитываются в укрупненном или упрощенном виде, в результате чего получение точных прогнозов затрудняется. На рисунке 2 представлен спутниковый снимок крупной песчано-пыльной бури, наблюдавшейся в Приаралье и на прилегающих к нему обширных территориях, который наглядно отражает масштаб и динамику распространения штормового процесса.



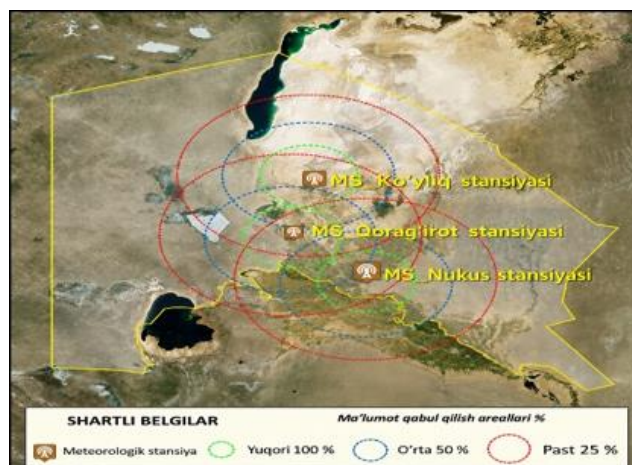
**Рисунок 2. Спутниковый снимок, полученный в период наблюдения песчано-пыльных бурь.**

Как видно из снимка, потоки пылевых масс, поднимаясь с высохших территорий вокруг Аральского моря, перемещались в северо-восточном направлении через Туркменистан, Каракалпакстан и северные регионы Узбекистана. Данный процесс подтверждает, что сила и направление атмосферных потоков оказывают прямое влияние на формирование песчано-пыльных бурь и дальность их распространения.

Явное проявление штормового очага на спутниковом снимке свидетельствует о резком снижении видимости в различных регионах, а также о возникновении опасных условий для транспорта и здоровья населения. Кроме того, наблюдается подъем пылевых частиц через слои атмосферы на большие высоты и их перенос на дальние расстояния. Данное обстоятельство еще раз доказывает, что экологическая опасность, характерная для Приаралья, имеет не только локальное, но и региональное и даже трансграничное значение.

Данный снимок еще больше актуализирует необходимость глубокого изучения механизмов формирования песчано-пыльных бурь, определения влияния на них метеорологических факторов и создания в будущем точных прогностических моделей. В заключении главы указано, что анализ формирования песчано-пыльных бурь в Приаралье, их экологических рисков, вредных последствий для здоровья населения и существующих научных изысканий дополнительно подтверждает актуальность данной темы, а также создает научную базу для разработки гибридной прогностической модели на основе SARIMA и XGBoost в последующих главах.

**Во второй главе** диссертации, озаглавленной «Объект, методология исследования и теоретический анализ материалов», обоснованы объект и предмет исследования, подробно освещены источники использованных данных, материалы наблюдений и методы научного исследования. В главе представлены теоретические основы статистических, математических моделей и моделей искусственного интеллекта, примененных для оценки и прогнозирования песчано-пыльных бурь. Также изложены анализ временных рядов, алгоритмы моделирования, критерии оценки результатов прогнозирования и методология обработки данных. Исследования опирались на данные по Муйнакскому, Кунградскому районам и городу Нукусу, которые являются наиболее близкими к высохшему дну Аральского моря и где песчано-пыльные бури наблюдаются с высокой частотой. Установлено, что в данных регионах интенсивность ветровой эрозии, широта дефляционных очагов и низкая плотность вегетации создают благоприятные аэроэкологические условия для формирования бурь (рисунок 3).



**Рисунок 3. Метеостанции, выбранные на объекте исследования.**

Климат указанных территорий является резко континентальным, количество осадков крайне мало (100-150 мм/год), летом температура воздуха повышается до  $+45^{\circ}\text{C}$  (в отдельных случаях и выше), а зимой опускается в среднем до  $-5-10^{\circ}\text{C}$ . Среднегодовая скорость ветра составляет 4-6 м/с, тогда как в штормовые дни она достигает 15-20 м/с и более. Преобладающими направлениями ветра являются западное и северо-западное, что усиливает перенос пыли с Аралкума и плато Устюрт. По этой причине данные территории рассматриваются как основной источник и транзитная зона песчано-пыльных бурь. Многолетние данные, зарегистрированные метеостанциями, позволяют определить частоту повторяемости, продолжительность бурь и их взаимосвязь с метеорологическими факторами. В таблице 2 ниже представлен стандартизированный вид первичных метеорологических данных, использованных в исследовании. Данные ежедневных наблюдений (температура воздуха, относительная влажность, средняя скорость и максимальные порывы ветра, дальность видимости, атмосферные осадки, синоптические явления и температура почвы), регистрируемые метеостанцией «Нукус» в соответствии с требованиями ВМО, были использованы в качестве основных входных параметров при оценке продолжительности и интенсивности песчано-пыльных бурь. Приведенные в таблице параметры впоследствии применялись в процессах контроля качества (QC), генерации признаков (lag/rolling), гибридного моделирования (SARIMAX + XGBoost) и верификации эпизодов; все расчеты исследования опираются именно на эту базу первичных наблюдений.

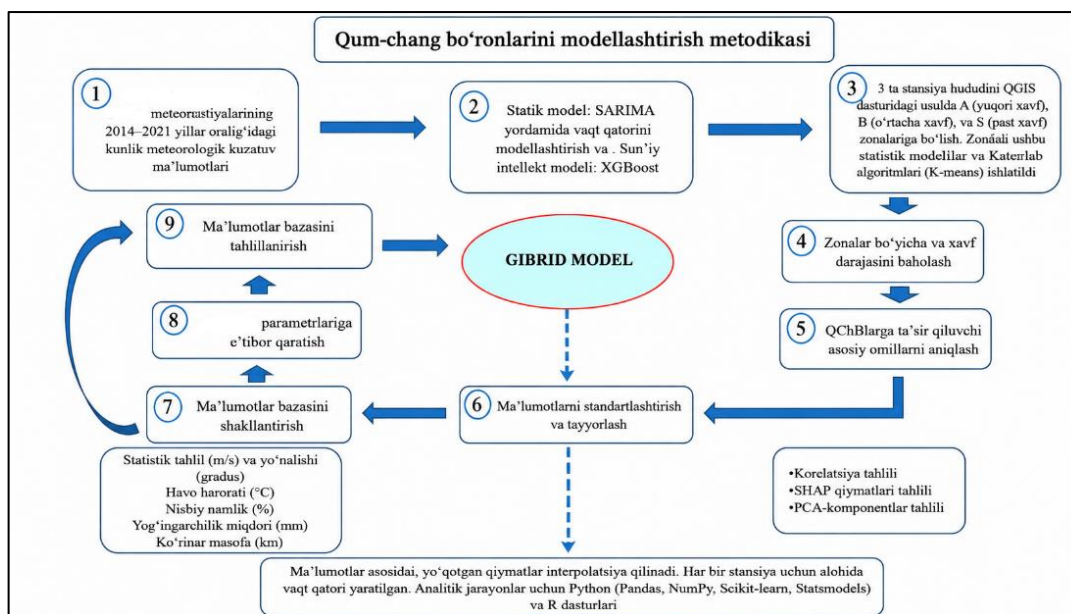
Информационную базу исследования составили ежедневные данные наблюдений метеостанции «Нукус» за период 2014–2023 гг., а также 30-дневные ретроспективные данные и 7-дневные прогнозные данные, полученные через Open Meteo API. Станционные измерения фиксировались по температуре, относительной влажности, средней и максимальной скорости ветра, осадкам, метеорологической дальности видимости (MOR) совместно с кодами ВМО для синоптических явлений. Также были привлечены данные наблюдений за температурой верхнего слоя почвы. Первичная форма измерений в табличном виде представлена в таблице 2.

## 2 -Таблица.

### Метеорологические данные Агентства гидрометеорологической службы, использованные в исследовании.

Nukus meteostansiyasi																			
Date/Parameters	Air temperature			Air humidity		Wind speed			Meteorological visibility	Precipitation			Meteorological processes (day)					soil temperature	
	T average	T min	T max	f aver.	f min	average	max	sh.yo'nalishi		night	day	Summary	Rain	Snow	fog	dust storms	Dust storm	min	max
Unit of measurement	(°C)	(°C)	(°C)	(%)	(%)	(m/s)	(m/s)	(°)	(m)	(m)	(mm)	(m)	(day)	(day)	(day)	days	hours	(°C)	(°C)
24 05 18	23,1	14	30,5	25	9	4,8	11	70	2000							0		52	13
25 05 18	23,4	11,4	34,3	21	8	3,5	10	70	2000							0		55	11
26 05 18	26,7	13,3	37,5	25	11	2	7	110	2000							0		61	9
27 05 18	19,6	15,4	31,1	42	25	5,6	18	340	200	0,0	0,0	6			1	14	32	15	
28 05 18	15,8	6,8	22,3	32	17	3	10	340	2000						1	3	49	7	
29 05 18	18,7	7,5	28,1	33	12	2,6	12	110	1000						1	3	48	5	
30 05 18	17,6	12,6	23,7	31	16	5	12	290	2000						1	2	48	12	
31 05 18	20,5	15,2	28,4	29	15	3,1	11	45	2000						0		50	12	

Во второй главе также освещены вопросы использования возможностей технологий искусственного интеллекта в прогнозировании песчано-пыльных бурь, при этом общая схема функционирования предложенного гибридного модельного подхода представлена на рисунке 4.



**Рисунок 4. Методическая схема прогнозирования песчано-пыльных бурь на основе гибридной модели.**

Показано, что процесс прогнозирования на основе данной схемы состоит из этапов сбора данных метеорологических наблюдений, их контроля качества и подготовки, формирования ключевых признаков, а также гибридного моделирования, объединяющего модели SARIMA и XGBoost. Особо обоснованы способность модели XGBoost выявлять нелинейные зависимости, ее адаптивность в условиях дисбаланса классов и высокая точность прогнозирования.

Первоначальные значения вероятности, полученные из модели, откалиброваны с помощью метода изотонической регрессии и согласованы с реально наблюдаемыми частотами. Откалиброванные вероятности

стабилизированы посредством процесса 3-дневного сглаживания и адаптированы для операционного использования с разделением на зеленый, желтый и красный уровни опасности. Данный подход обеспечивает стабильную и неразрывную связь между результатами прогноза и системой практического оповещения.

Результаты гибридной модели интерпретированы с помощью методологии SHAP-анализа, в ходе чего определены факторы, оказывающие наибольшее влияние на возникновение песчано-пыльных бурь. В частности, в качестве ключевых факторов были выделены максимальная скорость и порывы ветра, минимальная относительная влажность, низкие значения вегетационного индекса (NDVI), объем или отсутствие атмосферных осадков в течение последних 7-30 дней, а также индекс потенциала пылеобразования (DPI). Эти результаты согласуются с синоптическими и физическими механизмами формирования песчано-пыльных бурь.

Данный подход к моделированию основан на анализе временных рядов и машинного обучения, основанного на данных (*data driven*), где сезонность и динамика явлений песчано-пыльных бурь выражаются через модель SARIMA, а сложные нелинейные зависимости - с помощью модели XGBoost. Гибридный подход объединяет преимущества статистических моделей и моделей искусственного интеллекта, способствуя повышению точности и стабильности прогнозов.

Общее математическое выражение гибридного моделирования представляется в следующем виде:

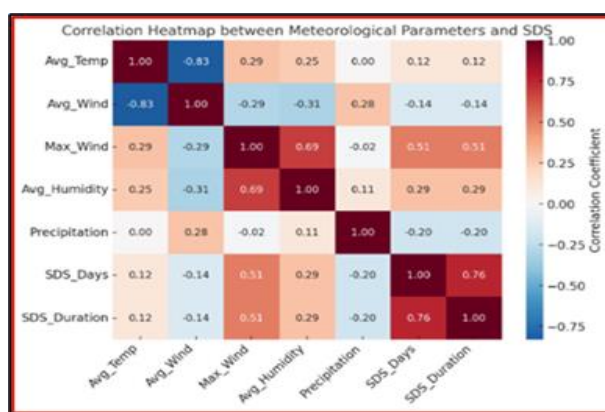
$$y(t) = SARIMA(y(t-1), \dots) + XGBoost(X(t)) + \varepsilon(t). \quad (1)$$

где:  $y(t)$  - значение явления песчано-пыльных бурь в момент времени  $t$ ;  $SARIMA(y(t-1), \dots)$  - статистическая модель, выражающая линейные и сезонные компоненты временного ряда;  $XGBoost(X(t))$  - модель искусственного интеллекта, учитывающая нелинейное влияние метеорологических факторов;  $\varepsilon(t)$  - случайная погрешность.

Таким образом, содержание 2 главы формирует полную научную основу региональной, метеорологической, статистической и основанной на искусственном интеллекте методологии, необходимой для моделирования песчано-пыльных бурь в условиях Приаралья, и служит прочным фундаментом для результатов прогнозирования, приводимых в последующих главах.

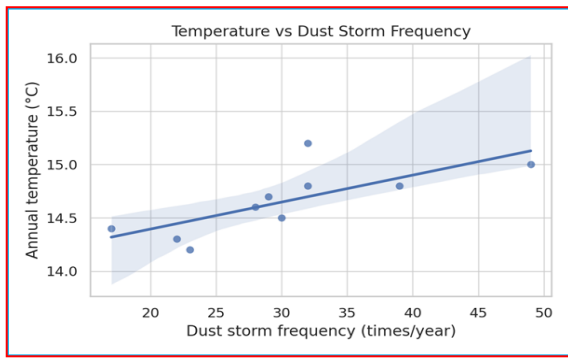
**В третьей главе** диссертации, озаглавленной «Аналитические результаты прогнозирования песчано-пыльных бурь на фоне климатических изменений», проанализированы долгосрочные тенденции изменения климатических показателей в регионе Приаралья, а также их влияние на формирование и

уровень опасности песчано-пыльных бурь. В главе представлены результаты статистического анализа с оценкой частоты повторяемости, продолжительности и интенсивности песчано-пыльных бурь на современном этапе во взаимосвязи с основными метеорологическими факторами. Также проведен сравнительный анализ результатов прогнозирования, полученных с помощью модели SARIMA и гибридных моделей на основе искусственного интеллекта, обоснованы их прогностическая точность и возможности практического применения. На рисунке 5 отражены взаимосвязи между частотой повторяемости и продолжительностью песчано-пыльных бурь с ключевыми метеорологическими показателями. Корреляционная матрица показывает, что максимальная скорость ветра имеет наиболее сильную положительную связь с продолжительностью песчано-пыльных бурь.

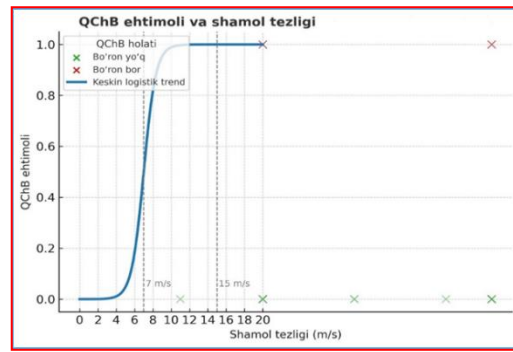


**Рисунок 5. Корреляция Пирсона между песчано-пыльными бурями и метеорологическими факторами.**

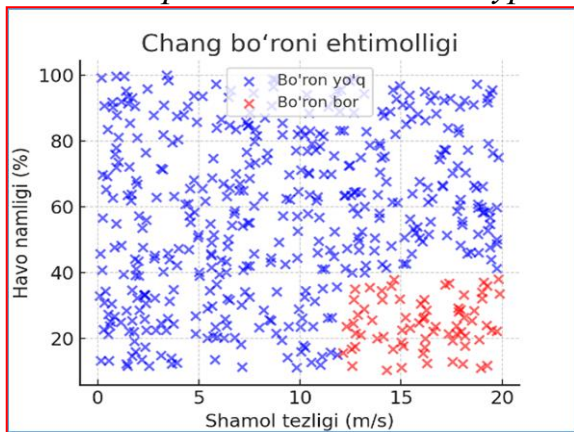
Установлено, что снижение средней относительной влажности повышает риск возникновения бурь, в то время как атмосферные осадки выступают фактором, снижающим частоту повторяемости песчано-пыльных бурь. Изменения температуры воздуха оказывают опосредованное влияние на песчано-пыльные бури, поскольку имеют обратную связь со скоростью ветра. В целом результаты матрицы подтверждают, что ветровой режим и сухость подстилающей поверхности являются ключевыми определяющими факторами в формировании песчано-пыльных бурь. На рисунке 6 ниже показаны взаимосвязи между частотой повторяемости песчано-пыльных бурь в Приаралье и основными метеорологическими факторами. Влияние изменений температуры, скорости ветра, минимальной температуры, осадков и влажности на формирование ППБ отражено с помощью линий регрессии. Графики демонстрируют, что частота повторяемости бурь возрастает преимущественно при высокой силе ветра и повышенных температурах, тогда как атмосферные осадки, напротив, снижают ее.



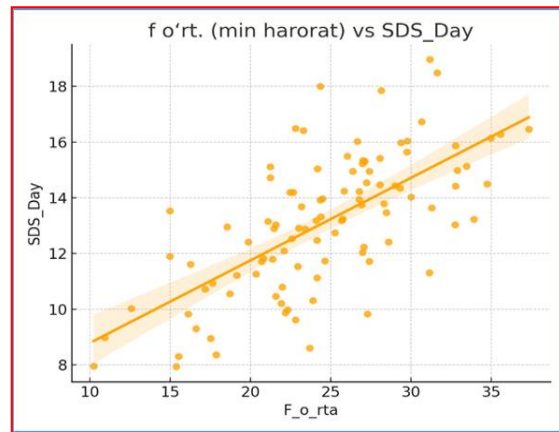
а) *Взаимосвязь между среднегодовой температурой и частотой повторяемости пыльных бурь*



б) *Взаимосвязь между скоростью ветра и вероятностью возникновения ППБ*



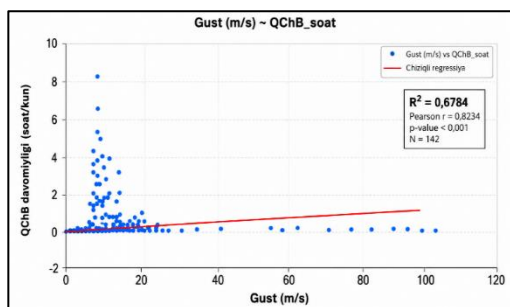
в) *Вероятность возникновения пыльной бури в зависимости от ветро-влажностных условий.*



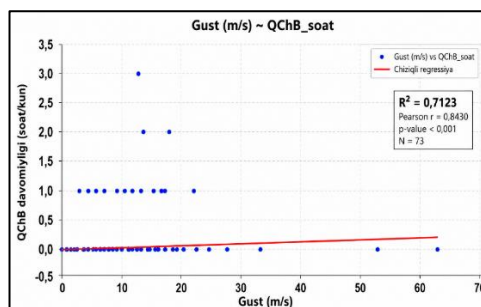
г) *Корреляция между минимальной температурой, количеством дней и возникновением ППБ.*

**Рисунок 6. Взаимосвязи между частотой повторяемости песчано-пыльных бурь в Приаралье и основными метеорологическими факторами.**

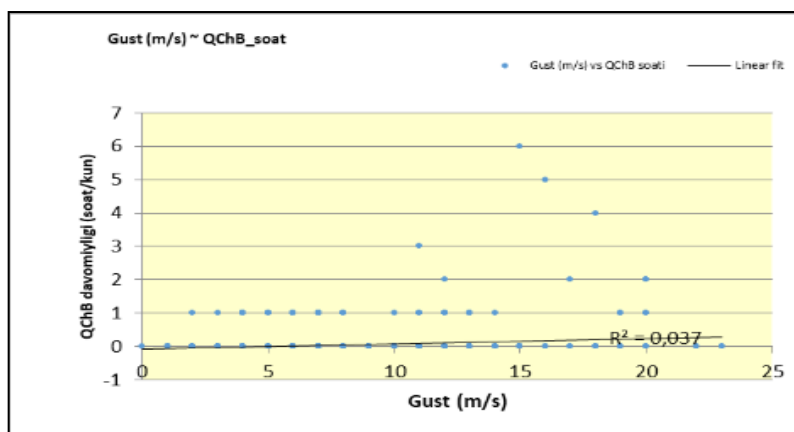
Из вышеприведенного анализа видно, что частота повторяемости песчано-пыльных бурь существенно связана с несколькими основными метеорологическими факторами. Наблюдается увеличение числа бурь по мере повышения температуры воздуха, что объясняется дальнейшим иссушением подстилающей поверхности и усилением дефляционного потенциала. Скорость ветра также является одним из наиболее значимых драйверов (движущих факторов), и в условиях высоких скоростей ветра частота повторяемости бурь резко возрастает. Напротив, при увеличении количества атмосферных осадков подъем пыли снижается, поскольку увлажненная поверхность ограничивает перенос частиц. Кроме того, минимальная температура воздуха и низкая относительная влажность создают предпосылки для активизации штормовых процессов. В целом графики подтверждают, что формирование ППБ происходит наиболее активно в условиях сильного ветра, высоких температур и дефицита осадков. Влияние ветра, являющегося одним из ключевых драйверов процесса, подробно рассмотрено на следующем рисунке.



а) Муйнак



б) Кунград



в) Нукус

**Рисунок 7. Линейная зависимость между импульсом ветра (порывами, м/с) и продолжительностью песчано-пыльных бурь (час/день) за период 2014–2023 гг.**

На рисунке 7 в сравнительном аспекте представлены взаимосвязи между импульсом ветра (порывами, м/с) и продолжительностью песчано-пыльных бурь (час/день) по данным метеостанций «Муйнак» (а), «Кунград» (б) и «Нукус» (в). На всех трех графиках по оси абсцисс отложены максимальные порывы ветра, а по оси ординат - зафиксированная продолжительность ППБ; поверх данных нанесены линия линейной регрессии и соответствующий коэффициент детерминации ( $R^2$ ). Эти показатели позволяют оценить, в какой степени импульс ветра способен «объяснить» вариацию продолжительности бури.

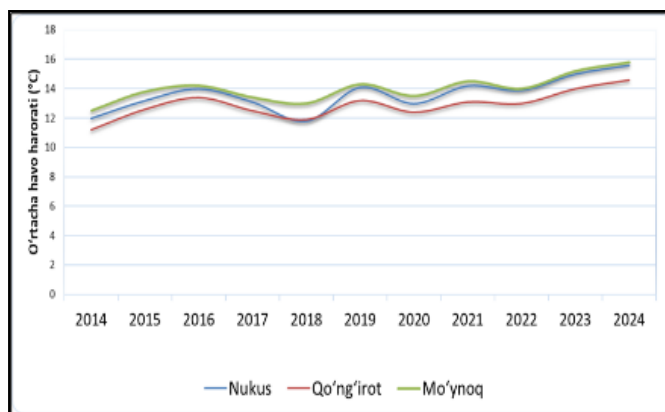
а) На станции «Муйнак» значения порывов ветра варьируют в диапазоне от 0 до 100 м/с, при этом в отдельные дни наблюдаются точки, где продолжительность бури достигала 3-4 часов. Несмотря на то, что линия регрессии имеет положительное направление, коэффициент  $R^2$  крайне низок, что указывает на невозможность полного объяснения продолжительности бури исключительно импульсом ветра. Однако общая тенденция свидетельствует о склонности бури к некоторому затяжному характеру в дни с сильными порывами ветра.

б) На станции «Кунград» диапазон порывов ветра составляет около 0–60 м/с, причем большинство точек сосредоточено в области относительно коротких значений продолжительности. Линия регрессии здесь практически

горизонтальна, а значение  $R^2$  очень мало. Это означает отсутствие сильной линейной связи между порывами ветра и продолжительностью ППБ в Кунграде, что указывает на более значимую роль других факторов (например, влажности поверхности, расстояния до очага эмиссии, синоптической ситуации).

в) На станции «Нукус» наблюдается аналогичная ситуация: значения порывов ветра находятся в относительно низком диапазоне, а продолжительность бури обычно составляет менее 1 часа, при этом точки сосредоточены в нижней области. Линия регрессии практически выположена,  $R^2$  крайне низок. Это свидетельствует о том, что в Нукусе ППБ носят преимущественно транзитный характер, то есть штормовые массы в основном переносятся из других регионов и оказывают здесь лишь кратковременное воздействие. В целом все три графика подтверждают, что импульс ветра является необходимым, но не достаточным условием, и для объяснения продолжительности ППБ требуется комплексный совместный учет факторов метеорологического режима и наземные факторы.

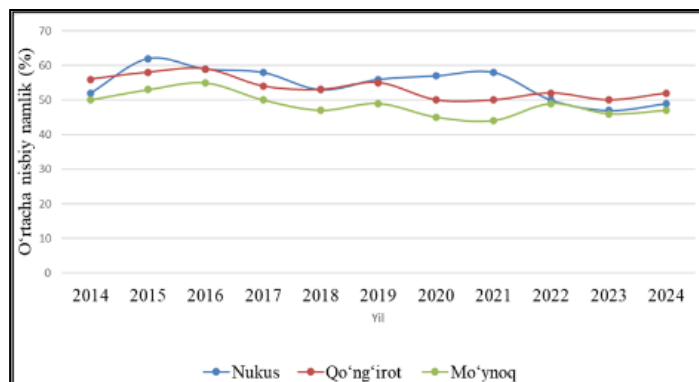
Вышеприведенные три рисунка систематически отражают динамику основных климатических показателей в регионе Приаралья (Муйнак, Кунград, Нукус) за период 2014–2024 гг. и позволяют научно обосновать фоновые условия, непосредственно связанные с формированием песчано-пыльных бурь. На рисунке 8 представлен график изменения среднегодовой температуры воздуха за 2014–2024 гг.



**Рисунок 8. Динамика средней температуры воздуха за период 2014–2024 гг.**

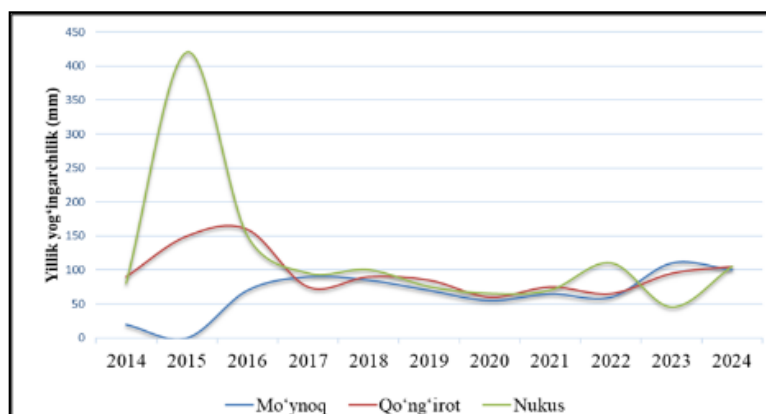
Как видно из диаграммы, во всех трех регионах наблюдается устойчивая тенденция к росту температуры: если в начальные годы среднегодовая температура находилась в пределах 11-12°C, то в последующие годы она поднялась до 14-16°C. Несмотря на то, что в отдельные годы отмечались незначительные спады, общий тренд является положительным, что наглядно демонстрирует процесс потепления климата. Муйнакский район, как территория, наиболее близкая к бывшему побережью Аральского моря, зачастую выделяется самыми высокими значениями температур; экстремальная летняя жара, быстрое нагревание поверхности Земли и интенсивное испарение в данном регионе еще больше усиливают

дефляционный потенциал. В Кунграде и Нукусе также зафиксирован рост температуры, что указывает на формирование еще более благоприятных энергетических условий для возникновения ППБ на фоне общего потепления в масштабах региона. На рисунке 9 показана динамика средней относительной влажности по регионам за 2014–2024 годы.



**Рисунок 9. Динамика средней относительной влажности воздуха по регионам.**

Согласно графику, в разрезе всех станций относительная влажность колебалась в пределах 50-70%, однако в последние годы в отдельных регионах наблюдается тенденция к смещению в сторону снижения. В Муйнаке уровень относительной влажности несколько ниже по сравнению с Нукусом и Кунградом, что подтверждает наличие здесь более сухого климата. Снижение относительной влажности приводит к иссушению воздушных масс, уменьшению влажности подстилающей поверхности и, как следствие, к увеличению вероятности подъема пылевых частиц в атмосферу. Особенно в весенне-летний период, когда снижение влажности происходит одновременно с повышением температуры, возникают оптимальные условия для начала ППБ. График влажности демонстрирует наличие «тенденции к аридизации» на фоне климатических изменений, что научно обосновывает усиление рисков возникновения песчано-пыльных бурь в ходе данного процесса. На рисунке 10 приведена динамика годового количества атмосферных осадков за период 2014–2024 гг.

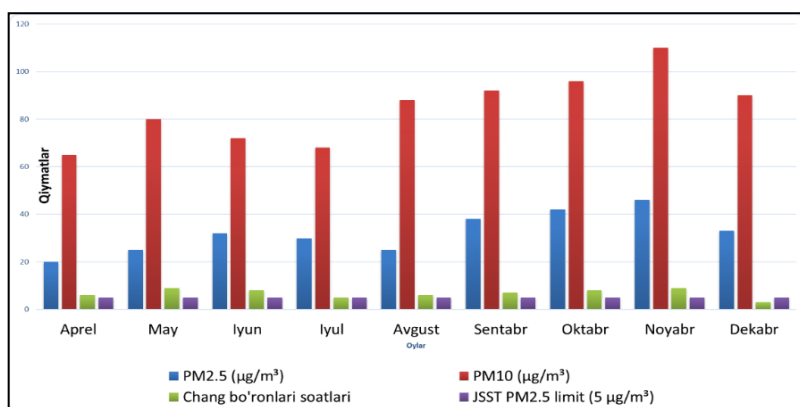


**Рисунок 10. Динамика годового количества атмосферных осадков за период 2014–2024 гг.**

Из диаграммы видно, что если в отдельные годы в начале рассматриваемого периода количество осадков было относительно высоким, то в последующие годы наблюдается резкое снижение, и на протяжении ряда лет объем осадков сохранялся на крайне низком уровне (в пределах 50-100 мм/год). В Муйнакском районе зафиксировано наименьшее количество осадков, что еще раз подтверждает экстремально аридные условия данной территории. В Кунграде и Нукусе также прослеживается тенденция к снижению количества осадков, однако в отдельные годы отмечаются кратковременные всплески. Общее уменьшение объема атмосферных осадков снижает степень увлажнения дефляционных поверхностей, переводя верхний слой почвы в рыхлое состояние, подверженное подъему пыли. Нарушение сезонного режима осадков, то есть отсутствие достаточного увлажнения весной и осенью, приводит к разрежению вегетационного покрова и ускорению процессов опустынивания.

При совместном анализе трех показателей отчетливо прослеживается, что за период 2014–2024 гг. климатический фон в регионе Приаралья изменяется в следующем направлении: температура воздуха растет, относительная влажность имеет тенденцию к некоторому снижению, а годовое количество осадков стабильно уменьшается. Комбинация этих трех факторов способствует увеличению числа засушливых, жарких и ветреных периодов в регионе, быстрому иссушению почвенных и солончаковых поверхностей и, как следствие, возрастанию вероятности возникновения песчано-пыльных бурь. Таким образом, данные три рисунка служат важным доказательным материалом для научного обоснования возрастающей угрозы ППБ на фоне климатических изменений и обеспечивают необходимый контекст для интерпретации результатов прогнозирования, приводимых в последующих главах.

На рисунке 11 ниже представлена динамическая взаимосвязь в разрезе месяцев между продолжительностью песчано-пыльных бурь (в часах) и концентрацией мелкодисперсных частиц PM<sub>2.5</sub> и PM<sub>10</sub> в воздухе. Как видно из графика, в период с мая по ноябрь значения PM<sub>10</sub> резко возрастают и достигают максимального уровня в осенние месяцы (в сентябре–ноябре: 92-110 мкг/м<sup>3</sup>). Данный процесс усиливается соответствующим образом по мере увеличения продолжительности ППБ. Значения PM<sub>2.5</sub> в несколько раз превышают нормативный предел ВОЗ (5 мкг/м<sup>3</sup>), что подтверждает негативное влияние песчано-пыльных бурь на качество атмосферного воздуха и здоровье человека. Этот график показывает, что песчано-пыльные бури являются одним из ключевых факторов, увеличивающих аэрозольную нагрузку на атмосферу.



**Рисунок 11. Ежемесячное распределение продолжительности ППБ, концентрации PM2.5 и PM10 в городе Нукусе в 2023 году.**

На графике наглядно показано, как изменяются концентрации PM2.5 и PM10 в течение года по мере увеличения продолжительности песчано-пыльных бурь. С ростом числа бурь в осенние месяцы уровень мелкодисперсных частиц в воздухе также резко возрастает, фиксируя значения, в несколько раз превышающие нормативы ВОЗ. Данный процесс сопровождается ухудшением качества атмосферного воздуха, снижением дальности видимости и усилением негативного воздействия на респираторную систему населения. График научно подтверждает, что ППБ являются одним из ключевых факторов аэрозольной нагрузки в регионе.

В таблице 3 приведено сопоставление частоты повторяемости, ежемесячной интенсивности и продолжительности песчано-пыльных бурь в Муйнакском, Нукусском и Кунградском регионах за период 2014–2023 гг.

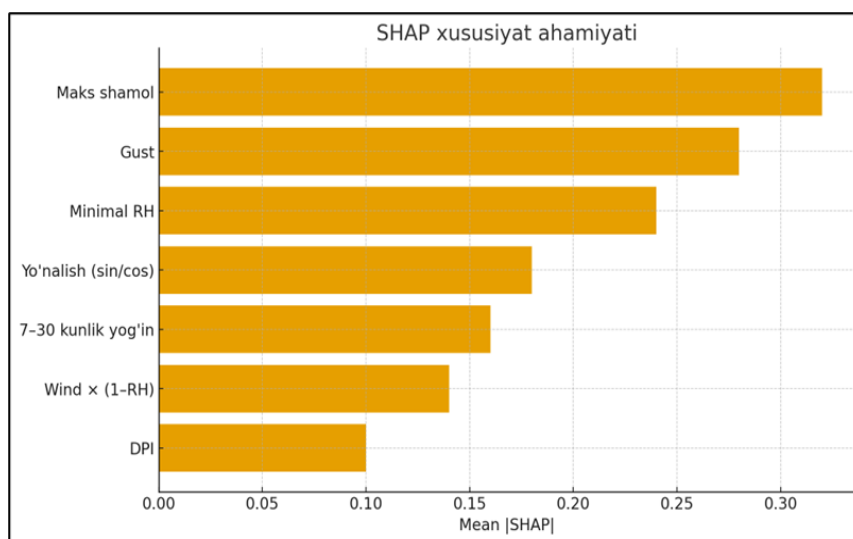
**Таблица 3.**

**Сопоставление частоты повторяемости, интенсивности и продолжительности ППБ по регионам.**

Регионы (2014–2023)	Среднее число дней с ППБ / год	Ежемесячная интенсивность (%)	Максимальная продолжительность (часы)	Примечание
Муйнак	17–49 дней (2014–2023)	10–30%, иногда 25–30%	Преимущественно 1–2 часа	Наибольшее число ППБ, но короткая продолжительность
Нукус	3–13 дней	0–10%, иногда 7–10%	0–6 часов, в 2018 году - 6 часов	Редкие ППБ, но иногда имеют затяжной характер
Кунград	7–18 дней	5–18%, иногда 15–18%	6–15 часов, в 2018 году - 15 часов	Наибольшая продолжительность, средняя интенсивность

Согласно полученным данным, наибольшее число дней с ППБ наблюдается в Муйнаке (от 17 до 49 дней в год), однако продолжительность бурь относительно коротка (как правило, 1-2 часа). В Кунграде же зафиксирована наибольшая продолжительность, достигающая в отдельные годы 15 часов. В Нукусе бури наблюдаются реже, однако в некоторые годы отмечается возрастание интенсивности процесса. Таблица наглядно демонстрирует, что климатические и дефляционные особенности территорий

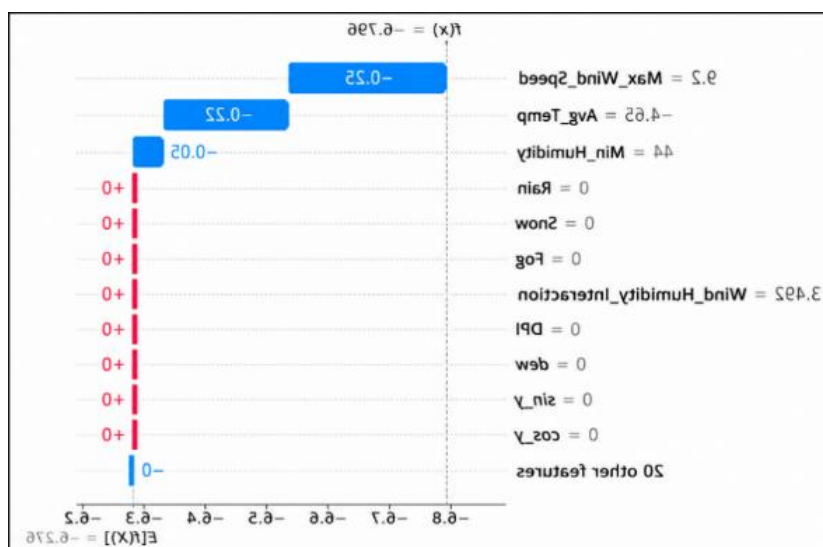
обуславливают существенные различия в параметрах бурь. На рисунке 12 на основе SHAP-анализа отражена относительная значимость метеорологических факторов, использованных в модели прогнозирования песчано-пыльных бурь.



**Рисунок 12. Значимость факторов на основе SHAP-анализа для прогнозирования вероятности возникновения ППБ.**

Согласно полученным результатам, максимальная скорость и порывы ветра являются ключевыми факторами, оказывающими наибольшее влияние на прогноз модели. Также установлено, что минимальная относительная влажность воздуха, направление ветра и показатели атмосферных осадков выступают важными факторами, определяющими вероятность возникновения песчано-пыльных бурь.

На рисунке 13 ниже с помощью диаграммы SHAP waterfall (каскадной диаграммы) показан процесс формирования решения модели прогнозирования песчано-пыльных бурь для отдельного наблюдения.



**Рисунок 13. Диаграмма SHAP waterfall (каскадная диаграмма).**

Согласно полученным результатам, максимальная скорость ветра, средняя температура воздуха и минимальная относительная влажность являются факторами, оказавшими наибольшее влияние на результат прогноза, тогда как вклад остальных метеорологических и календарных признаков был относительно мал. На данном рисунке с помощью диаграммы SHAP waterfall поясняется процесс формирования прогностического решения модели для отдельного наблюдения (конкретного дня). На диаграмме каждый фактор отображается последовательно в соответствии с его вкладом в выходные данные модели: зафиксировано, что максимальная скорость ветра, средняя температура и минимальная относительная влажность формируют результат прогноза с наибольшей долей участия, в то время как остальные метеорологические и календарные признаки оказывают относительно небольшое воздействие. Данный рисунок имеет важное значение, поскольку выводит модель из состояния «черного ящика» и наглядно демонстрирует причинно-следственные связи прогноза. Научная новизна данного подхода заключается в том, что результаты гибридной модели, примененной для прогнозирования песчано-пыльных бурь в условиях Приаралья, интерпретированы на основе метода SHAP, благодаря чему приоритетность факторов, оказывающих наибольшее влияние на прогноз, определена на количественной основе. Это создает понятную и надежную аналитическую базу для ведомств, принимающих решения (мониторинг, профилактика, оповещение), при оценке рисков ППБ и совершенствовании систем раннего оповещения в условиях Узбекистана.

В заключение следует отметить, что в данной главе на основе метеорологических данных за период 2014–2024 гг. проанализированы основные климатические факторы, влияющие на формирование и динамику песчано-пыльных бурь в Приаралье. Установлено, что повышение температуры воздуха, снижение относительной влажности и количества осадков, а также сезонное усиление скорости ветра напрямую связаны с частотой повторяемости и продолжительностью ППБ. Резкое увеличение концентраций PM<sub>2.5</sub> и PM<sub>10</sub> в штормовые периоды подтвердило ведущую роль ППБ в формировании аэрозольной нагрузки на атмосферу. Полученные результаты обосновали необходимость комплексной интеграции метеорологических факторов при прогнозировании песчано-пыльных бурь.

**В четвертой главе** диссертации, озаглавленной «**Прогнозирование, оценка и внедрение результатов исследования песчано-пыльных бурь**», изложены практические результаты разработанного интегрированного подхода к оценке и упреждающему прогнозированию песчано-пыльных бурь. В главе на основе классификации метеорологических данных и данных мониторинга, полученных из различных источников, проанализированы результаты прогнозирования на базе моделей SARIMA и XGBoost, а также оценены их точность и надежность. Кроме того, обоснованы возможности автоматизации разработанных алгоритмов прогнозирования, доведения их до

пользователей и внедрения в системы экологического мониторинга и раннего оповещения.

В таблице 4 ниже приведена статистика охвата и разбивки набора данных, использованного при прогнозировании песчано-пыльных бурь (ППБ). Данные охватывают период 2014-2025 гг. и разделены на обучающую, валидационную, тестовую и вневременную выборки. Доля дней с ППБ в каждой выборке находится в пределах 3,6-4,1%, а соотношение классов сохраняется в диапазоне от 1:23 до 1:27, что обеспечивает возможность стабильного обучения и оценки моделей. Из данных таблицы видно, что явления песчано-пыльных бурь происходят редко по сравнению с общим числом наблюдений, что вызывает дисбаланс классов в наборе данных. В связи с этим в процессе моделирования особое внимание было уделено правильному разделению данных во времени и сохранению относительно стабильной доли ППБ в обучающей, валидационной и тестовой выборках.

**Таблица 4**

**Статистика охвата данных и их разбивки по выборкам**

Выборка	Годы	Число дней	Дни с ППБ (класс 1)	Частота ППБ (%)	Соотношение классов (1:0)
Train (Обучающая)	2014–2019	2192	82	3,7	1: 25,7
Validation (Валидационная)	2020–2021	731	30	4,1	1: 23,4
Test (Тестовая / финальная)	2022–2023	730	28	3,8	1: 25,1
Out-of-time (Вневременная)	2024–2025	690†	25	3,6	1: 26,8

Вневременные (out-of-time) данные послужили для тестирования разработанных моделей в реальных условиях и оценки их обобщающей способности.

В таблице 5 ниже приведены показатели калибровки модели прогнозирования песчано-пыльных бурь на тестовой и вневременной (операционной) выборках. В таблице в сравнительном аспекте оценены надежность модели и качество прогноза для состояний до и после калибровки.

**Таблица 5**

**Калибровочные индикаторы (тестовые и вневременные)**

Сегмент (выборка)	ESE (↓)	Бриер (↓)	Надежность (↓)	Разрешение (↑)	PR-AUC (↑)
Test (pre-cal) (Тестовый до калибровки)	0,078	0,087	0,056	0,031	0,41
Test (post-cal) (Тестовый после калибровки)	0,028	0,081	0,014	0,034	0,41
Ops (pre-cal) (Операц. до калибровки)	0,092	0,094	0,067	0,029	0,39
Ops (post-cal) (Операц. после калибровки)*	0,034	0,088	0,018	0,031	0,40

Из данных таблицы видно, что после калибровки на тестовом сегменте показатель ESE снизился с 0,078 до 0,028, надежность - с 0,056 до 0,014, а индекс Бриера - с 0,087 до 0,081. Точно так же на вневременных (операционных) данных показатель ESE снизился с 0,092 до 0,034, надежность - с 0,067 до 0,018, а индекс Бриера - с 0,094 до 0,088. В то же время значения PR-AUC на тестовом (0,41) и операционном (0,39-0,40) сегментах практически не изменились, а стабильное сохранение индекса разрешения подтверждает, что разделяющая способность модели не ухудшилась.

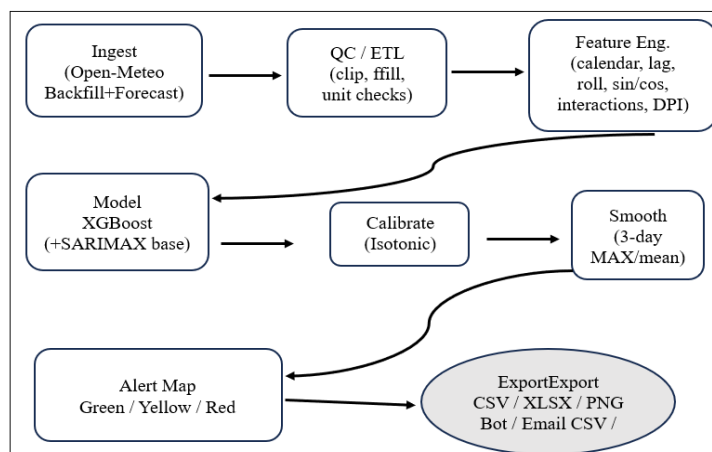
В таблице 6 ниже приведены средние значения метрик валидации для моделей SARIMA, XGBoost и их гибридной модели, использованных при прогнозировании песчано-пыльных бурь. Таблица позволяет сравнить эффективность моделей на основе показателей точности и погрешности.

**Таблица 6**

**Метрики валидации для моделей прогнозирования песчано-пыльных бурь (средние значения)**

Модели	Точность	ROC_AUC	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>
<b>SARIMA</b>	0,946	0,74	0,240	0,182	0,28
<b>XGBoost</b>	0,957	0,86	0,205	0,154	0,41
<b>SARIMA + XGBoost (гибрид)</b>	<b>0,963</b>	<b>0,89</b>	<b>0,188</b>	<b>0,136</b>	<b>0,49</b>

Согласно данным таблицы, гибридная модель SARIMA+XGBoost показала более высокие результаты по сравнению с обособленными моделями SARIMA и XGBoost, продемонстрировав следующие показатели: Точность = 0,963, ROC\_AUC = 0,89, RMSE = 0,188, MAE = 0,136 и R<sup>2</sup> = 0,49. В частности, если для модели SARIMA значения составили ROC\_AUC = 0,74 и R<sup>2</sup> = 0,28, а для модели XGBoost - ROC\_AUC = 0,86 и R<sup>2</sup> = 0,41, то это свидетельствует о том, что гибридный подход позволил существенно повысить точность прогнозирования и интерпретируемость модели. Кроме того, в целях автоматизации процесса прогнозирования песчано-пыльных бурь и его внедрения в практику была разработана архитектура гибридного конвейера (pipeline), объединяющая статистический подход и методы искусственного интеллекта (рисунок 14).



**Рисунок 14. Архитектура гибридного конвейера (pipeline) прогнозирования песчано-пыльных бурь на основе моделей (SARIMAX–XGBoost)**

На рисунке показан прогностический конвейер (pipeline), включающий этапы сбора и верификации метеорологических данных, генерации признаков, моделирования на основе алгоритмов SARIMAX–XGBoost, калибровки вероятностей и сглаживания полученных результатов. Итоговые результаты ранжируются по уровням опасности и доводятся до пользователей посредством карт и систем автоматического оповещения (бот и электронная почта).

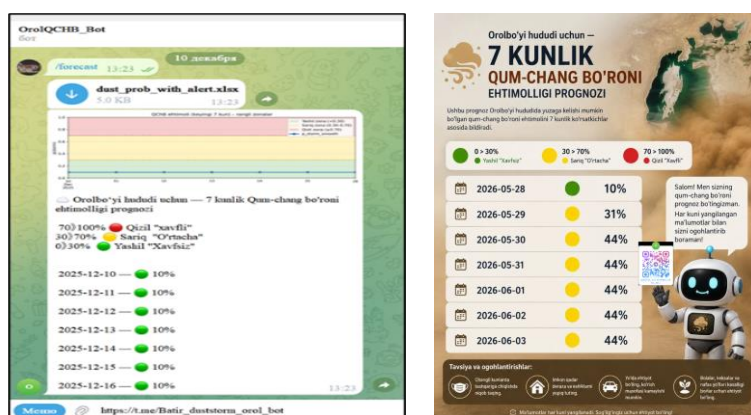
**Таблица 7.**

**Варианты автоматизации: возможности и ограничения**

Вариант	Планирование	Безопасность	Логирование	Контроль ресурсов	Сценарий применения
GitHub Actions	Cron (YAML)	Secrets (encrypted)	Job log (history)	Cloud (runner)	Удобен для Prod, экономичен
VPS + Docker	cron/systemd	.env + secrets	File-log + rotate	Полный контроль	Prod (стабильный, гибкий)
Colab (резервный вариант)	Вручную	N/A	Notebook output	Ограниченный	Демо/тест, резерв

В таблице 7 в сравнительном аспекте представлены основные технические варианты, которые могут быть применены при автоматизации системы прогнозирования песчано-пыльных бурь, их возможности и ограничения. Среда Colab подходит преимущественно для демонстрационных, тестовых и экстренных резервных сценариев, имея ограниченные возможности для непрерывной эксплуатации. Данное сопоставление служит основой для принятия практических решений при выборе автоматизированного решения.

Из данных таблицы видно, что если вариант GitHub\Actions является малозатратным и удобным для производственной среды (production), то решение VPS + Docker обеспечивает высокую стабильность и гибкость. На рисунке 15 ниже представлен интерфейс Telegram-бота (@Batir\_duststorm\_orol\_bot), осуществляющего прогнозирование песчано-пыльных бурь с заблаговременностью до 7 дней, в котором результаты прогноза для региона Приаралья автоматически оцениваются по уровням опасности и доводятся до пользователя в графическом и процентном выражении.



**Рисунок 15. Интерфейс Telegram-бота для прогнозирования песчано-пыльных бурь с заблаговременностью до 7 дней.**

Результаты, предоставляемые посредством бота, визуализируются в разрезе дней с помощью цветowych индикаторов, четко разделяя категории безопасного, умеренного и высокого уровней опасности. Также обеспечена возможность выгрузки прогнозных данных в формате электронных таблиц Excel. Данный интерфейс служит для оперативной оценки рисков песчано-пыльных бурь пользователями, принятия упреждающих мер защиты и упрощения процесса принятия практических решений.

В данной главе обобщены основные результаты, полученные по прогнозированию, оценке и внедрению методов исследования песчано-пыльных бурь. На примере региона Приаралья создана возможность прогнозирования песчано-пыльных бурь с заблаговременностью до 7 дней с помощью гибридных моделей на основе статистических методов и искусственного интеллекта. Точность и надежность результатов прогнозирования оценены на основе различных статистических критериев. Кроме того, разработанные модели интегрированы в автоматизированную систему, и налажен механизм доведения информации до пользователей посредством Telegram-бота. Доказано, что полученные результаты имеют важное практическое значение для совершенствования систем экологического мониторинга и раннего оповещения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты научно-исследовательских работ, проведенных в рамках диссертационного исследования по теме **«Прогнозирование продолжительности песчано-пыльных бурь в регионе Приаралья в условиях изменения климата»**, позволили сделать следующие выводы:

1. Для модели краткосрочного прогнозирования пыльно-песчаных бурь в Приаралье в качестве основных метеорологических факторов были выбраны максимальная скорость ветра, количество последних осадков, прогнозируемые погодные условия, а также сезонная изменчивость. Результаты моделирования подтвердили, что данные факторы оказывают существенное влияние на формирование и интенсивность пыльно-песчаных бурь. На основе полученных результатов были систематизированы региональные научные подходы, выявлены существующие методологические проблемы и исследовательские пробелы, а также сформирована научно-теоретическая база работы.

2. Согласно результатам, максимальная скорость ветра и порывы ветра (*gust*) являются основными факторами, оказывающими наибольшее влияние на прогноз пыльно-песчаных бурь. Анализ SHAP показал, что минимальная относительная влажность, средняя температура и количество осадков также играют важную роль. На основе полученных результатов разработана шкала оценки уровня риска: низкий риск (0–30%), средний риск (30–60%), высокий риск (60–80%) и очень высокий риск (80–100%). Установлено, что значения выше 60% указывают на высокую вероятность возникновения пыльно-песчаных бурь и подъема пыли в регионе Приаралья. Данный подход обеспечивает надежную основу для практической интерпретации прогнозных результатов и систем раннего предупреждения.

3. По результатам регионального анализа за 2014–2023 годы установлено, что наибольшая частота пыльно-песчаных бурь наблюдается в Муйнакском районе, тогда как в Кунградском районе отмечается наибольшая продолжительность явлений. В городе Нукус такие явления встречаются реже. Отмечены значительные различия по уровню месячной интенсивности и продолжительности, что подтверждает неравномерность пространственного распределения пыльно-песчаных бурь в Приаралье.

4. Данные были разделены на обучающую (*train*), валидационную (*validation*), тестовую (*test*) и *out-of-time* выборки за период 2014–2025 годов. Результаты показали стабильность частоты пыльно-песчаных бурь в диапазоне 3,6–4,1% во всех подвыборках, а также сбалансированность классов в пределах соотношения 1:23–1:27. Это подтверждает временную согласованность данных и обеспечивает надежную основу для обучения и обобщения модели.

5. С помощью SHAP-анализа была определена относительная значимость метеорологических факторов, влияющих на результаты прогноза, что обеспечило интерпретируемость модели. Это расширяет возможности

применения прогнозных результатов в процессах принятия практических решений.

6. Анализ полученных прогнозных результатов показал, что точность разработанного подхода составляет от 78,8% до 93%, что подтверждает его высокую эффективность и надежность в прогнозировании пыльно-песчаных бурь.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES  
PHD.18/2025.27.12.T.01.01 AT SCIENTIFIC- RESEARCH INSTITUTE OF  
ENVIRONMENT AND NATURE CONSERVATION TECHNOLOGIES**

---

**RESEARCH INSTITUTE OF ENVIRONMENT AND NATURE  
CONSERVATION TECHNOLOGIES**

**KHALMURATOV BATIR KHALBAY ULI**

**FORECASTING THE DURATION OF SAND AND DUST STORMS  
IN THE ARAL SEA REGION UNDER CLIMATE CHANGE CONDITIONS**

**11.00.05 – Environmental protection and rational use of natural resources**

**ABSTRACT OF THE DISSERTATION FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF  
PHILOSOPHY (PHD) IN TECHNICAL SCIENCES**

**Tashkent – 2026**

The dissertation topic for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences has been registered with the Supreme Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovations of the Republic of Uzbekistan under registration number B2025.3.PhD/T414.

The dissertation was completed at the Research Institute of Environment and Nature Conservation Technologies

The abstract of the dissertation is available in three languages (Uzbek, Russian, and English summary) on the website ([ecoilm.uz](http://ecoilm.uz), [uznature.uz](http://uznature.uz)) and on the "ZiyoNet" information and educational portal at [www.ziyo.net](http://www.ziyo.net).

<b>Scientific Supervisor:</b>	<b>Pulatov Bakhtiyor Alimovich</b> Doctor of technical sciences, professor
<b>Official Opponents:</b>	<b>Sharipov Shavkat Mukhamajanovich</b> Doctor of Geographical Sciences, Professor <b>Gafforov Husen Shirinovich</b> Doctor of Philosophy (PhD) technical Sciences, Senior Researcher.
<b>Leading Organization:</b>	<b>Karakalpak Research Institute of Natural Sciences, Karakalpakstan Branch of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan</b>

The defense of the dissertation will be held on 15.06 2026 at 15<sup>00</sup> hours at the meeting of the Scientific Council PhD.18/2025.27.12.T.01.01 at the Research Institute of Environment and Nature Conservation Technologies under the Central Asian University for Environmental and Climate Change Studies (Green University). Address: 2, Chimkent Yuli Street, Darkhan, Tashkent District, Tashkent Region, 111104. Contacts: tel: (77) 782-27-17; e-mail: [eco\\_ilm@umail.uz](mailto:eco_ilm@umail.uz).

The dissertation is available for review at the Information and Resource Center of the Research Institute of Environment and Nature Conservation Technologies under the Central Asian University for Environmental and Climate Change Studies (Green University). Address: 2, Chimkent Yuli Street, Darkhan, Tashkent District, Tashkent Region, 111104. Contacts: tel: (77) 782-27-17; e-mail: [eco\\_ilm@umail.uz](mailto:eco_ilm@umail.uz).

The abstract of the dissertation was distributed on 08.06 2026.

(Mailing registry protocol No. 26/02 dated 08.06 2026)



**L. N. Samiyev**  
Deputy Chairman of the Scientific Council,  
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

**O. G. Ergashev**  
Scientific Secretary of the Scientific Council,  
Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences,  
Associate Professor

**Sh. O. Murodov**  
Chairman of the Scientific Seminar  
under the Scientific Council,  
Doctor of Technical Sciences, Professor

## INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

### **Purpose of the Research**

This research focuses on determining the formation and duration of dust and sand storm events in the Aral Sea region through an analysis of the principal meteorological drivers governing their development, developing predictive methodologies based on modern statistical techniques and artificial intelligence approaches, and implementing the obtained results within environmental monitoring and early warning frameworks.

### **The objectives of the research:**

to analyze existing scientific literature and previously conducted research studies on the observation, assessment, and forecasting of dust and sand storms;

to identify the main meteorological factors influencing the formation of dust and sand storms in the Aral Sea region;

to perform modeling for forecasting the duration of dust and sand storms using a hybrid approach based on statistical methods and artificial intelligence;

to theoretically and experimentally substantiate the key parameters and performance of the applied modeling approach;

assessment of the reliability and accuracy of forecasting results based on various statistical criteria.

**The object of the research** is dust and sand storms occurring in the Aral Sea region, as well as the meteorological processes determining their formation and duration.

### **The scientific novelty of the study is as follows:**

A fully automated conceptual framework has been developed for the short-term forecasting of dust and sand storms in the Aral Sea region, incorporating statistical analysis and processing of meteorological data, as well as near-real-time operational data transmission.

A computational methodology has been developed to identify the conditions conducive to dust and sand storm formation by integrating key meteorological parameters, including maximum wind speed, mean air temperature, minimum relative humidity, principal components derived through Principal Component Analysis (PCA), and both statistical and machine-learning approaches.

A hybrid forecasting model has been developed for predicting dust and sand storms in the Aral Sea region through the integration of SARIMA and XGBoost models. The proposed approach reduced the Expected Calibration Error (ECE) from 0.078 to 0.028 on the test dataset and from 0.092 to 0.034 on the out-of-time dataset, demonstrating a forecasting accuracy improvement of 78.8–93%.

Under the environmental conditions of the Aral Sea region, a scientifically grounded forecasting system capable of predicting dust and sand storm events up to seven days in advance has been developed for operational and user-oriented applications.

**Implementation of research results.** Based on the results of forecasting the duration of dust and sand storms in the Aral Sea region under climate change conditions:

A fully automated conceptual model for short-term forecasting of dust and sand storms in the Aral Sea region, developed with consideration of near-real-time operational data transmission capabilities, has been implemented in practice (Reference No. 02/08-182-2709, issued by the Ministry of Ecology, Environmental Protection and Climate Change of the Republic of Karakalpakstan on 21 August 2025). As a result, the accuracy and timeliness of early detection and short-term forecasting of dust and sand storms in the Aral Sea region have been significantly improved.

A computational methodology designed to enhance the accuracy of dust and sand storm forecasting in the Aral Sea region has been implemented in practice. The methodology integrates statistical and machine-learning models based on maximum wind speed, mean air temperature, minimum relative humidity, and principal components identified through Principal Component Analysis (PCA). This approach has been adopted by the Kungrad and Muynak divisions of the Ministry of Ecology, Environmental Protection and Climate Change of the Republic of Karakalpakstan (Reference No. 02/08-182-2709, dated 21 August 2025). As a result, forecasting accuracy has been improved, and specialists have gained access to a reliable and operational forecasting system for wider practical application.

A hybrid forecasting model based on the integration of SARIMA and XGBoost models for predicting dust and sand storms in the Aral Sea region has been implemented in operational practice. The model is currently being utilized within the system of the Ministry of Ecology, Environmental Protection and Climate Change of the Republic of Karakalpakstan (Reference No. 02/08-182-2709, dated 21 August 2025). The implementation of this model increased forecasting accuracy by 78.8–93%, thereby improving the reliability of early detection, risk assessment, and decision-making processes related to dust and sand storm events.

An automated information and software system intended for end users, namely the Telegram bot @Batir\_dusstorm\_orol\_bot, capable of providing short-term forecasts of dust and sand storm events up to seven days in advance under the environmental conditions of the Aral Sea region, has been implemented in practice. The system is currently being used within the Ministry of Ecology, Environmental Protection and Climate Change of the Republic of Karakalpakstan (Reference No. 02/08-182-2709, dated 21 August 2025). As a result, it has become possible to forecast dust and sand storms up to seven days in advance, deliver timely and reliable information to both the public and domain specialists, and support the implementation of preventive management measures aimed at mitigating potential emergency situations.

### **Structure and scope of the thesis.**

The thesis consists of an introduction, four chapters, general conclusions, a list of references, and appendices. The total volume of the thesis is 120 pages.

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

**I bo'lim (I часть; I part)**

1. Xalmuratov B., Pulatov B. Qum va chang bo'ronlarining paydo bo'lishini tahlil qilish // Ekologiya xabarnomasi: ijtimoiy-iqtisodiy, ilmiy-amaliy jurnal. – Toshkent, 2025. – №1 (13). – B. 29–37. (11.00.00.№03).

2. Xalmuratov B., Pulatov B. Assessment of the Intensity and Seasonal Distribution of Sand and Dust Storms in the Aral Sea Region // Qoraqalpog'istonda fan va ta'lim: elektron ilmiy jurnal. – Nukus, 2025. – №2/2. – B. 96–104. – ISSN 2181-9203. (OAK rayosatining 2020-yildagi tegishli qarori bilan dissertatsiya ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy jurnallar ro'yxatiga kiritilgan).

3. Xalmuratov B.X., Kuziyev F., Alimov Z. Orolbo'yi mintaqasi turli nuqtalaridagi meteorologik va havo sifati ko'rsatkichlarining vaqt bo'yicha o'zgarishi (Nukus va Mo'ynoq misolida) // Ekologiya xabarnomasi: ijtimoiy-iqtisodiy, ilmiy-amaliy jurnal. – Toshkent, 2025. – №2 (15). B. 44-51. (11.00.00.№03)

4. Alimov Z., Xalmuratov B.X. Chemical Composition and Toxicity of PM2.5 and TSP in Nukus, Karakalpakstan // Qoraqalpog'istonda fan va ta'lim: elektron ilmiy jurnal. – Nukus, 2024. – №4/2. – B. 403–413. – ISSN 2181-9203. (OAK rayosatining 2020-yildagi tegishli qarori bilan dissertatsiya ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy jurnallar ro'yxatiga kiritilgan).

5. Xalmuratov B.X. A Meteorologically-Based Statistical Model for Short-Term Forecasting of Sand and Dust Storms in the Aral Sea Region // Экономика и социум: ilmiy-amaliy elektron jurnal. – Moskva, 2025. B. 139–145. – №07070. – ISSN 2225-1545. DOI: [https://www.iupr.ru/\\_files/ugd/b06fdc146a2918be4044a3956c0fdc4727b660.pdf](https://www.iupr.ru/_files/ugd/b06fdc146a2918be4044a3956c0fdc4727b660.pdf). (OAK rayosatining 2019-yildagi tegishli qarori bilan dissertatsiya ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy jurnallar ro'yxatiga kiritilgan).

6. Sadriddinov B.B., Xalmuratov B.X., Pulatov B.A. Havodagi PM zarrachalari ortishida qum-chang bo'ronlarining roli (Nukus shahri misolida) // Ekologiya xabarnomasi: ijtimoiy-iqtisodiy, ilmiy-amaliy jurnal. – Toshkent, 2025. – №3. – B. 36–41. (11.00.00.№03).

7. Xalmuratov B.X. Forecasting Sand and Dust Storms in the Aral Sea Region // American Journal of Applied Science and Technology. – 2025. – Vol. 5, No. 12. – P. 222–230. – DOI: 10.37547/ajast/Volume05Issue12-40. (O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan tan olinadigan xorijiy ilmiy nashrda chop etilgan. Amerika jurnali 35-baza crossref (Asos OAK 3-bet)).

## **II bo‘lim (II часть; II part)**

8. Xalmuratov B.X. Qishloq xo‘jaligida agrometeorologik xizmat ko‘rsatishning bugungi kundagi o‘rni // Atrof-muhit muhofazasi va ekologik rayonlashtirish: muammo va yechimlar mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy anjuman materiallari. – Toshkent, 2023-yil 7-iyun. – B. 1005–1009.

9. Xalmuratov B.X., Pulatov B.A., Alimov Z.B. Orolbo‘yi mintaqasida chang bo‘ronlarining qishloq xo‘jaligiga ta’siri // Orol dengizi qurishining atrof-muhitga ta’siri mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy anjuman materiallari. – Toshkent, 2024-yil 22-aprel. – B. 541–551.

10. Xalmuratov B.X. Orolbo‘yi qum-chang bo‘ronlarining janubga tomon tarqalishi // Ekologiya, atrof muhitni asrash va yashil makon: muammo, yechimlar va natijalar mavzusidagi xalqaro ilmiy va ilmiy-texnik anjuman materiallari. – Qarshi, 2025-yil 30–31-may. – B. 72–81.

11. Xalmuratov B.X., Pishenbayev S.T. Orolbo‘yi mintaqasi qum-chang bo‘ronlarining davomiyligi va intensivligini shakllantiruvchi meteorologik omillarni aniqlash va baholash // Academic Research in Modern Science xalqaro ilmiy onlayn konferensiyasi materiallari. – AQSH, 2025-yil 29-iyul. – B. 132–142. – DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.16416776>

Avtoreferat “Ekologiya xabarnomasi” ijtimoiy-iqtisodiy, ilmiy-amaliy jurnal tahririyatida tahrirdan o‘tkazildi (o‘zbek, rus ingliz (rezyume) tillaridagi matnlar mosligi tekshirildi. (19.05.2026-yil)



Bosishga ruxsat etildi: 03.06.2026-yil.  
Bichimi 60x84 <sup>1/16</sup>, “Times New Roman”  
garniturada raqamli bosma usulida bosildi.  
Shartli bosma tabog‘i 4. Adadi: 100. Buyurtma: № 62.  
Tel (99) 817 44 54.  
Guvohnoma reyestr № 219951  
“PUBLISHING HIGH FUTURE” OK nashriyotida bosildi.  
Toshkent sh., Uchtepa tumani, Ali qushchi ko‘chasi, 2A-uy.