OROLQUMDA CHANG EMISSIYASINING POTENSIAL SEZGIRLIGINI OCHIQ SUN'IY YO'LDOSH VA REANALIZ MA'LUMOTLARI ASOSIDA BAHOLASH (2018–2026)

Saydullayev O.A.
Irrigatsiya va suv muommolari ilmiy tadqiqot instituti doktoranti
Saidov J.E.
Favqulodda vaziyatlar vazirligi akademiyasi dotsenti , t.f.f.d (PhD).
jahongirsaidov.1986@gmail.com
ORCID:0009-0001-8448-1264

Annotatsiya. Orolning qurigan tubi — Markaziy Osiyodagi eng yirik chang-tuz manbalaridan biri, biroq mintaqadagi 26 ma'muriy birlikdan atmosfera havosining yer usti o'lchovlari faqat ikkitasida olib boriladi. Maqolada ochiq sun'iy yo'ldosh (Sentinel-2, MODIS MAIAC, Sentinel-5P) va ERA5-Land reanaliz ma'lumotlari asosida Orolqumning potensial chang emissiyasi sezgirligi xaritasi tuzildi, indeksning og'irliklarga sezgirligi tekshirildi va dala tekshiruvi uchun 20 ta ustuvor nomzod katak ajratildi. Tahlil hududi (68 365 km²) Orolning 1960-yilgi sathidan (53 m) pastda joylashgan eng katta yaxlit maydon sifatida SRTM relyefida aniqlandi. 2019–2025-yillarda ochiq tuproq maydoni 6 204 km² ga oshgan, o'simlik qoplami 50,2 foizga qisqargan. Kuchli (≥ 6 m/s) shamol soatlari ulushi aprel (33,4 %) va may (33,9 %) oylarida eng yuqori bo'lib, sirt namligi eng past bo'lgan davrga to'g'ri keladi; ustun shamol NE–NNE yo'nalishida. Quruqlikning 6 380 km² i (10,1 %) "juda yuqori" sezgirlik sinfiga kirdi; zona maydoni muqobil og'irliklarda 5 972–6 659 km² oralig'ida qoldi (Jaccard J = 0,91–0,99). Tanlangan 20 ta katak (jami 498 km²) Z1 va Z2 sektorlarida joylashgan. Indeks fizik emissiya modeli emas: u o'lchangan emissiyani emas, nisbiy sezgirlikni ifodalaydi va dalada tasdiqlanishi lozim.

Kalit so‘zlar: Orolqum, chang emissiyasi, masofaviy zondlash, Sentinel-2, ERA5-Land, Google Earth Engine, ustuvor kataklar

Аннотация. Высохшее дно Аральского моря является одним из крупнейших источников пыли и солей в Центральной Азии, однако наземные измерения качества воздуха проводятся лишь в двух из 26 административных единиц региона. С использованием открытых спутниковых данных (Sentinel-2, MODIS MAIAC, Sentinel-5P) и данных реанализа ERA5-Land в среде Google Earth Engine была составлена карта потенциальной подверженности территории Аралкума пылевыбросам, проведена оценка чувствительности индекса к изменению весовых коэффициентов и определены 20 приоритетных ячеек-кандидатов для последующей полевой проверки.

Территория исследования площадью 68 365 км² была выделена на основе цифровой модели рельефа SRTM как крупнейшая непрерывная территория с высотными отметками 53 м и ниже. В период 2019–2025 гг. площадь оголённых почв увеличилась на 6 204 км², а растительный покров сократился на 50,2%. Доля часов со скоростью ветра ≥ 6 м/с достигает максимальных значений в мае (33,9%) и апреле (33,4%), что совпадает с периодом быстрого высыхания поверхности. Преобладающее направление ветра — северо-восточное и северо-северо-восточное (СВ–ССВ).

Площадь территории, отнесённой к классу «очень высокая» подверженность пылевыбросам, составила 6 380 км² (10,1%). При использовании альтернативных весовых коэффициентов её площадь находилась в диапазоне 5 972–6 659 км² (индекс Жаккара J = 0,91–0,99). Разработанный индекс не является физической моделью эмиссии пыли: он позволяет ранжировать территории по относительной подверженности пылевыбросам и требует проверки результатов в ходе полевых исследований.

Ключевые слова: Аралкум, пылевыбросы, дистанционное зондирование, Sentinel-2, ERA5-Land, Google Earth Engine, приоритетные ячейки.

Abstract. The dried bed of the Aral Sea is one of the largest dust and salt sources in Central Asia, yet ground-based air measurements are made in only two of the 26 administrative units of the region. Using open satellite (Sentinel-2, MODIS MAIAC, Sentinel-5P) and ERA5-Land reanalysis data in Google Earth Engine, we mapped potential dust-emission susceptibility of the Aralkum, tested the sensitivity of the index to weights and identified 20 priority candidate cells for field verification. The analysis area (68,365 km²) was delineated on the SRTM terrain as the largest contiguous area at or below 53 m. In 2019–2025 bare soil increased by 6,204 km² and vegetation declined by 50.2%. The share of hours with wind speed ≥ 6 m/s peaks in May (33.9%) and April (33.4%), coinciding with rapid surface drying; the prevailing wind is NE–NNE. 6,380 km² (10.1%) of land fell into the “very high” class, and its area stayed within 5,972–6,659 km² under alternative weights (Jaccard J = 0.91–0.99). The index is not a physical emission model; it ranks relative susceptibility and requires field validation.

Keywords: Aralkum, dust emission, remote sensing, Sentinel-2, ERA5-Land, Google Earth Engine, priority cells

KIRISH

Orol dengizining qurishi natijasida hosil bo‘lgan Orolqum cho‘li chang-tuz aerozollarining faol manbaiga aylangan [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Chang bo‘ronlari mintaqada mavsumiy xarakterga ega [8, 9], ular Qoraqalpog‘iston va Xorazm aholisi uchun havo sifati va salomatlik xavfining asosiy omillaridan biri hisoblanadi. Biroq mintaqadagi 26 ma’muriy birlikdan atmosfera havosining yer usti o‘lchovlari faqat ikkitasida — Nukus va Urganch shaharlarida — olib boriladi, Orolqumga eng yaqin Mo‘ynoq va Qo‘ng‘irot tumanlarida doimiy kuzatuv posti mavjud emas. Natijada

Orolqumning o‘zi faol chang manbai sifatida asosan adabiyot asosida tavsiflanadi, mintaqaning o‘z ma’lumotlari bilan miqdoriy tavsif yetishmaydi.

Bunday sharoitda ochiq sun’iy yo‘ldosh va reanaliz ma’lumotlari yer usti o‘lchovlarini to‘ldiruvchi vosita sifatida qo‘llanishi mumkin. Maqolaning maqsadi — Orolqumning potensial chang emissiyasi sezgirligini sirt holati va meteorologik sharoitlar bo‘yicha baholash, natijaning indeks og‘irliklariga sezgirligini tekshirish va dala tekshiruvi hamda chang monitoringi uchun ustuvor maydonlarni ajratishdir. Natijalar o‘lchangan emissiyani emas, potensial sezgirlikni ifodalashi alohida ta’kidlanadi.

MATERIAL VA METODLAR

Tahlil hududi va ma’lumotlar

Tahlil hududi (AOI) Orolning 1960-yilgi sathiga (taxminan 53,4 m) tayanib [1], SRTM relyef modelida [10] balandligi ≤ 53 m bo‘lgan eng katta yaxlit hudud sifatida ajratildi. Uning maydoni 68 365 km²; hudud beshta sektorga bo‘lindi: Z1 — janubi-g‘arbiy (Mo‘ynoq atrofi), Z2 — janubi-sharqiy, Z3 va Z4 — markaziy-g‘arbiy va markaziy-sharqiy, Z5 — shimoliy. Indeks hisoblangan quruqlik (2026-yilgi suv piksellarisiz) 62 888 km² ni tashkil etdi.

Hisob-kitoblar Google Earth Engine platformasida [11, 12] bajarildi. Quyidagi ma’lumotlar qayta ishlandi: Sentinel-2 L2A (har yili 1-aprel — 24-oktabr median kompoziti, 60 m) [13]; ERA5-Land soatlik reanalizi (10 m balandlikda shamol va 0–7 sm qatlam namligi; taxminan 11 km) [14]; MODIS MCD19A2 aerozol optik qalinligi (AOD) [15]; Sentinel-5P yutuvchi aerozol indeksi (AAI) [16]. Mo‘ynoq meteostansiyasi kuzatuvlari [17] shamol ma’lumotlarini solishtirish uchun nazarda tutilgan.

Sirt sinflari va shamol chegarasi

Sentinel-2 tasvirlarida bulut va soya niqoblangach, har bir piksel suv (NDWI > 0) [18], o‘simlik (NDVI ≥ 0,12) [19] yoki ochiq tuproq sinfiga ajratildi; ochiq tuproq indeksi BSI sirt turini farqlash uchun ishlatildi [20]. Chang ko‘tarilishining

model chegarasi 6–6,5 m/s atrofida [21], eng qulay sirt sharoitida esa 4,4–9,8 m/s oralig‘ida [22]; shu sababli 6 m/s konservativ chegara sifatida olindi, hisob bahorgi oylar (mart–may) uchun bajarildi. Trendlar Theil–Sen nishabligi va Mann–Kendall testi bilan [23, 24, 25], shamol gullari esa AOI ichidagi to‘rtta tayanch nuqtada (P1–P4) soatlik ma’lumotlar bo‘yicha baholandi.

Kompozit sezgirlik indeksi (eksperimental)

Har bir piksel uchun indeks uch tarkibiy qismning o‘rtacha qiymati sifatida hisoblandi:

$$I = (B + W + M) / 3$$

bu yerda B — 2018–2026-yillarda pikselning ochiq tuproq sinfiga tushgan yillar ulushi; W — bahorgi soatlarda shamol tezligi WS ≥ 6 m/s bo‘lgan ulush;

M — bahorgi sirt quruqligi (namlikning teskari qiymati). W va M AOI bo‘yicha P2–P98 persentillari orasida [0; 1] ga me’yorlandi. AOD va AAI olisdan tashilgan aerozolni ham aks ettirgani uchun indeksga kiritilmadi va mustaqil tekshiruv uchun ishlatildi. Sinflar indeks persentillari bilan ajratildi: past ($I < P50 = 0{,}777$), o‘rtacha ($I < P75 = 0{,}879$), yuqori ($I < P90 = 0{,}965$) va juda yuqori ($I \geq P90$). Og‘irliklarga sezgirlik to‘rtta muqobil sxema bilan [26, 27], zonalar mosligi Jaccard koeffitsienti (J) [28] va Pearson r bilan baholandi. Ustuvor nomzodlarni tanlash uchun zona 5 × 5 km kataklarga bo‘lindi va markazlari orasida kamida 10 km masofa sharti bilan o‘rtacha indeksi eng yuqori 20 ta katak tanlandi.

NATIJALAR

Yer qoplamining o‘zgarishi

2019–2025-yillarda AOI da ochiq tuproq maydoni 6 204 km² ga oshdi, o‘simlik qoplami qariyb ikki barobar (50,2 %) qisqardi, suv yuzasi 1 553 km² ga kamaydi. Nisbiy jihatdan o‘simlik eng ko‘p markaziy-sharqiy (Z4: −58,6 %) va shimoliy (Z5: −56,1 %) sektorlarda yo‘qolgan; mutlaq yo‘qotish Z5 da eng katta (taxminan 2 000 km²), Mo‘ynoq atrofidagi Z1 da −49,6 %. 2026-yilda o‘simlik maydoni 8 059 km² gacha qayta oshgan, biroq bu bitta yil natijasi bo‘lib, sababi

aniqlanmagan va barqaror tiklanish deb talqin qilinmaydi; shu sababli 2026-yil trendlarga kiritilmadi.

1-jadval.

Orolqum AOI sektorlari va yer qoplamining o‘zgarishi, 2019–2025-yillar

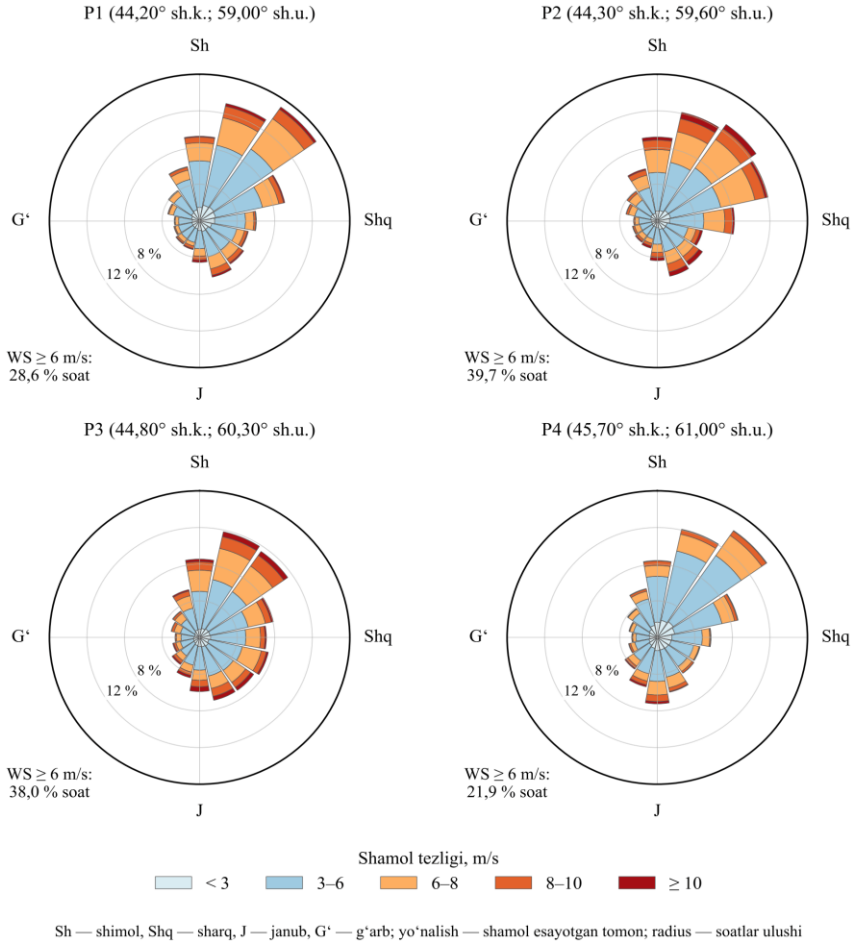
Ko‘rsatkich	Qiymat
AOI maydoni (SRTM, ≤ 53 m)	68 365 km²
Indeks hisoblangan quruqlik	62 888 km²
Ochiq tuproq maydonining o‘sishi	+6 204 km²
O‘simlik qoplamining qisqarishi	−50,2 %
Suv yuzasining kamayishi	−1 553 km²
O‘simlikning nisbiy yo‘qotilishi: Z4 / Z5 / Z1	−58,6 % / −56,1 % / −49,6 %
O‘simlik maydoni 2026-yilda (bitta yil)	8 059 km²

Manba: Sentinel-2 L2A asosida muallif hisobi.

Shamol rejimi va sirt namligi

AOI bo‘yicha yillik o‘rtacha shamol tezligi 2018–2025-yillarda 4,77–5,13 m/s oralig‘ida bo‘lib, trend aniqlanmadi (Theil–Sen +0,005 m/s/yil; Kendall p = 0,72). WS ≥ 6 m/s soatlar ulushi may (33,9 %) va aprelda (33,4 %) eng yuqori, sirt namligi esa yanvar–fevraldagi 0,115 m³/m³ dan iyul–avgustda 0,033 m³/m³ gacha tushadi. Demak, kuchli shamolli aprel–may sirtning tez qurish davriga to‘g‘ri keladi, bu chang bo‘ronlarining mavsumiyligiga mos keladi [8]. Soatlik shamol gullariga ko‘ra (1-rasm) P1–P4 ning barchasida ustun sektor NE yoki NNE; kuchli (WS ≥ 6 m/s) soatlarning 38,6–49,9 % i NNE–E sektorlaridan esadi. Ikkinchi darajali yo‘nalishlar — shimoliy (kuchli bahorgi soatlarning 19,7–22,2 % i

N–NNW dan, NW bilan birga 23,8–26,6 %) va janubi-sharqiy (SE–SSE; 11,8–14,4 %). Top-20 kataklarga eng yaqin P2 nuqtasida bahorgi soatlarning 44,4 % ida WS ≥ 6 m/s bo‘lgan.



1-rasm. ERA5-Land tayanch nuqtalarida (P1–P4) soatlik shamol gullari, 2018-01-01 – 2026-10-18.

Aerozol ko‘rsatkichlari bilan mustaqil tekshiruv

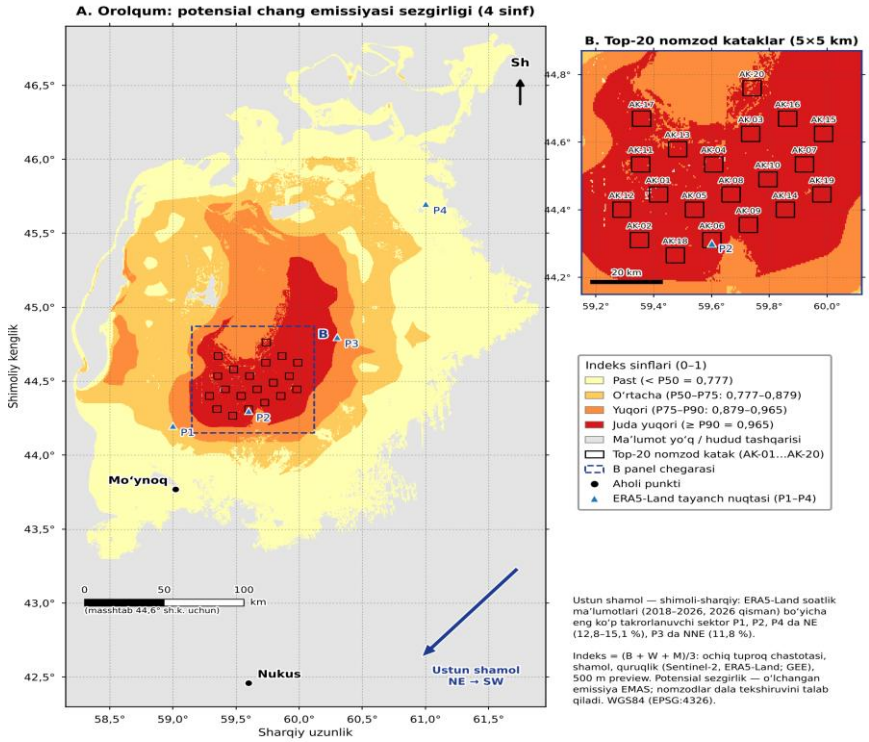
AOI o‘rtacha AOD ning mavsumiy maksimumi bahor oxiri va yoz boshiga to‘g‘ri keladi (may — 0,262); bahorgi o‘rtacha AOD 2018-yilda eng yuqori (0,34), 2025–2026-yillarda eng past (0,17 va 0,16) bo‘lgan. Sektorlar bo‘yicha bahorgi AOD maksimumi top-20 kataklar joylashgan Z1–Z2 da doimiy kuzatilmaydi, ya’ni AOD xavf xaritasining fazoviy tuzilishini mustaqil tasdiqlamaydi. Eng yuqori AOD kuni (2018-yil 29-may; 2,69) Qoraqalpog‘istonni qamragan tuz-chang bo‘roniga to‘g‘ri keladi [29], biroq bu hodisada chang shimoli-g‘arbiy oqim bilan tashilgan. AOD va AAI anomaliyasi o‘rtasidagi bog‘liqlik o‘rtacha (Pearson

r = 0,30).

Sezgirlik xaritasi va og‘irliklarga sezgirlik

AOI quruqligining 6 380 km² i (10,1 %) “juda yuqori” potensial sezgirlik sinfiga kirdi (2-rasm). Bu sinf janubi-markaziy Orolqumda (44,2–45,3° sh.k., 59,1–60,3° sh.u.) yaxlit massiv hosil qiladi. Muqobil og‘irliklarda indeks maydonlari asosiy variant bilan kuchli korrelyatsiyada (r = 0,95–0,99), “juda yuqori” zona maydoni 5 972–6 659 km² oralig‘ida qoladi va chegaralari asosan barqaror (J = 0,91–0,99); faqat shamol komponentiga 0,50 og‘irlik berilganda moslik pasayadi (J = 0,77).

Bu barqarorlikning sababini ochiq tan olish lozim: dengiz tubining katta qismi deyarli har yili ochiq bo‘lgani uchun B ko‘p joyda 1 ga yaqin, shu sababli zona shakli asosan ERA5-Land ning silliq, taxminan 11 km li W va M maydonlari bilan belgilanadi (xaritadagi to‘g‘ri chiziqli qirralar ham shundan). Bundan tashqari, ERA5-Land kataklarining taxminan 15–18 % ida bahorgi sirt namligi model diapazonining pastki chegarasiga (~0,010 m³/m³) teng va top-20 kataklarning barchasi shunday kataklarda joylashgan; u yerda M = 1 o‘lchangan quruqlikdan ko‘ra model parametrlarini aks ettirishi mumkin.



2-rasm. Orolqumda potensial chang emissiyasi sezgirligi sinflari va top-20 ustuvor nomzod kataklar (A — umumiy ko‘rinish, B — kattalashtirilgan hudud).

Ustuvor nomzod kataklar

Tanlangan 20 ta katak Z1 (8 ta) va Z2 (12 ta) sektorlarida, 44,27–44,76° sh.k. va 59,29–59,99° sh.u. oralig‘ida joylashgan; ularning jami maydoni 498 km², barchasida ochiq tuproq chastotasi 0,982–1,000. 13 ta katakda BSI > 0 (tuproq yoki qum yuzasi ehtimoli, 325 km²), 7 tasida BSI ≤ 0 (ehtimoliy tuz qobig‘i yoki sho‘rxok, 173 km²); bu tasdiqlanmagan belgilar tiklash usulini tanlashda dastlabki mezon bo‘lishi mumkin. Indeks yuqori qismda to‘yingani uchun 20 ta katak bir xil ustuvorlik guruhi sifatida qaraladi.

2-jadval.

Asosiy

natijalar va barqarorlik ko‘rsatkichlari

Ko‘rsatkich	Qiymat
“Juda yuqori” sinf maydoni (I ≥ 0,965)	6 380 km² (quruqlikning 10,1 %)
Muqobil og‘irliklarda zona maydoni	5 972–6 659 km²

Zonalar mosligi (Jaccard J)	0,91–0,99 (shamolga 0,50 og‘irlikda 0,77)
Indeks maydonlari korrelyatsiyasi (r)	0,95–0,99
Top-20 katak: Z1 / Z2	8 / 12
Top-20 jami maydoni	498 km²
BSI > 0 / BSI ≤ 0 kataklar	13 (325 km²) / 7 (173 km²)
AOD–AAI anomaliyasi bog‘liqligi (Pearson r)	0,30

MUHOKAMA

Natijalar o‘lchangan emissiyani emas, sirt holati va meteorologik sharoitlar bo‘yicha nisbiy sezgirlikni ifodalaydi. Quyidagi bog‘lanishlar yo‘nalish va mavsum mosligi darajasidagi dalillar bo‘lib, ekspozitsiya yoki sababiy ta’sirning isboti emas, chunki chang tarqalishi modellashtirilmagan. Birinchidan, ustun NE oqimda Mo‘ynoq (top-20 kataklardan taxminan 66–124 km janubi-g‘arbda) va Qo‘ng‘irot tumani “juda yuqori” zonaga nisbatan shamol ostida joylashadi; Nukus (taxminan 201–256 km janubda) esa shimoliy sektor shamollarida shamol ostida qoladi va 2018-yil may hodisasida asosiy zarar ko‘rgan shahar aynan Nukus bo‘lgan. Ikkinchidan, Nukusdagi PM2.5 ning bahorgi cho‘qqisi (aprelda

51,1 mkg/m³) [30] kuchli shamolli va sirt tez quriydigan aprel–may davriga mos keladi, biroq PM2.5 qatori faqat bir yilni qamraydi va cho‘qqiga mahalliy manbalar ham hissa qo‘shishi mumkin.

Amaliy jihatdan natijalar Mo‘ynoq va Qo‘ng‘irotning monitoring postlari

1-navbatiga kiritilishiga zid emas, biroq bu mustaqil tasdiq emas. Xaritani tekshirish uchun birinchi bevosita dalilni quyidagilar beradi: Mo‘ynoq postini Orolqumga qaragan tomonda joylashtirish, ERA5-Land shamolini Mo‘ynoq meteostansiyasi kuzatuvlari [17] bilan solishtirish va top-20 dan 4–6 ta katakda chang tutqichlar hamda arzon PM sensorlarini o‘rnatish.

Cheklovlar

Indeks fizik emissiya modeli emas: tuproq granulometriyasi, sirt qobig‘ining mustahkamligi, chegaraviy ishqalanish tezligi va g‘adir-budurlik hisobga

olinmagan, xarita va sinflash dalada tekshirilmagan. Zona shakli taxminan 11 km li ERA5-Land maydonlariga va qurigan tubni modelda ifodalash noaniqligiga bog‘liq, top-20 kataklarda M to‘yingan; sinflar mutlaq xavfni emas, nisbiy tartibni ifodalaydi. AOI geomorfologik proksi bo‘lib, Amudaryo deltasining past qismlarini ham qisman qamraydi; NDVI ≥ 0,12 chegarasi siyrak saksovulzorni to‘liq ajratmaydi. MODIS qamrovi past (o‘rtacha 28,1 %), AAI qatorida 2021-yil iyulida darajaning sakrashi bor va AAI chang hamda tutunni ajratmaydi; AOD va AAI yer usti konsentratsiyasi emas. 2026-yil to‘liq emas va trendlarga kiritilmadi. Salomatlik bilan bog‘lanish ekologik (agregat) darajadagi dalil [31]; tuproqdagi og‘ir metallar, sho‘rlanish va pestitsid qoldiqlari o‘lchanmagan.

XULOSA

2019–2025-yillarda Orolqumda ochiq tuproq maydoni 6 204 km² ga oshgan, o‘simlik qoplami qariyb ikki barobar qisqargan. Kuchli shamollar ulushi sirt tez quriydigan aprel–mayda eng yuqori, ustun shamol shimoli-sharqdan esadi, biroq hujjatlashtirilgan 2018-yil may bo‘roni shimoliy–shimoli-g‘arbiy oqim bilan bog‘liq bo‘lgan. “Juda yuqori” potensial sezgirlik zonasi (6 380 km², quruqlikning 10,1 %) janubi-markaziy Orolqumda, Mo‘ynoq va Qo‘ng‘irotga nisbatan shamolning yuqori tomonida joylashgan va og‘irliklar tanloviga nisbatan asosan barqaror. Ajratilgan 20 ta nomzod katak (498 km²) dala tekshiruvi va chang monitoringi uchun ustuvor maydonlar sifatida taklif etiladi; natijalar ekspozitsiya va sababiy bog‘liqlikni isbotlamaydi.

ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. Micklin P. The Aral Sea disaster // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. — 2007. — Vol. 35. — P. 47–72.

2. Indoitu R., Kozhoridze G., Batyrbaeva M. et al. Dust emission and environmental changes in the dried bottom of the Aral Sea // Aeolian Research. — 2015. — Vol. 17. — P. 101–115.

3. Liu J., Ding J., Liu B. et al. Characteristics of salt dust aerosols and their transport implications in the Aral Sea region // Atmospheric Chemistry and Physics. — 2025. — Vol. 25(5). — P. 2891–2912.

4. Chen Z., Gao X., Lei J. Dust emission and transport in the Aral Sea region // Geoderma. — 2022. — Vol. 415.

5. Banks J.R., Toon O.B., Giles D.M., Heavens N.G., Mathers J. Impacts of the desiccation of the Aral Sea on the Central Asian dust life-cycle // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. — 2022. — Vol. 127(15). — e2022JD036618.

6. Bazarbayev S. et al. Physical and chemical properties of dust in the Pre-Aral region of Uzbekistan // Environmental Science and Pollution Research. — 2022. — Vol. 29. — P. 75123–75139.

7. Bao A., Yu T., Xu W., Lei J., Jiapaer G., Chen X., Tojibaev K., Shomurodov X. Ecological problems and ecological restoration zoning of the Aral Sea // Acta Geographica Sinica. — 2024. — Vol. 79(5). — P. 1234–1248.

8. Indoitu R., Orlovsky L., Orlovsky N. Dust storms in Central Asia: spatial and temporal variations // Journal of Arid Environments. — 2012. — Vol. 85. — P. 62–70.

9. Ge Y., Wu N., Abuduwaili J., Kulmatov R., Issanova G., Saparov G. Identifying seasonal and diurnal variations and the most frequently impacted zones of dust over Central Asia using CALIPSO observations // Atmospheric Research. — 2022. — Vol. 275. — Art. 106255.

10. Farr T.G., Rosen P.A., Caro E. et al. The Shuttle Radar Topography Mission // Reviews of Geophysics. — 2007. — Vol. 45, №2. — RG2004. — DOI: 10.1029/2005RG000183. — URL:https://doi.org/10.1029/2005RG000183

11. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote Sensing of Environment. — 2017. — Vol. 202. — P. 18–27. — DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031. — URL:https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

12. Drusch M., Del Bello U., Carlier S. et al. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services // Remote Sensing of Environment. — 2012. — Vol. 120. — P. 25–36. — DOI: 10.1016/j.rse.2011.11.026. — URL:https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026

13. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A. et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications // Earth System Science Data. — 2021. — Vol. 13, №9. — P. 4349–4383. — DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021. — URL:https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021

14. Lyapustin A., Wang Y., Korkin S., Huang D. MODIS Collection 6 MAIAC algorithm // Atmospheric Measurement Techniques. — 2018. — Vol. 11, №10. — P. 5741–5765. — DOI: 10.5194/amt-11-5741-2018. — URL:https://doi.org/10.5194/amt-11-5741-2018

15. Veefkind J.P., Aben I., McMullan K. et al. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications // Remote Sensing of Environment. — 2012. — Vol. 120. — P. 70–83. — DOI: 10.1016/j.rse.2011.09.027. — URL:https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027

16. O'zbekiston Gidrometeorologiya xizmati agentligi. Mo'ynoq meteostansiyasining TM-1 kuzatuv jurnallari (1995–2024). — Nukus.

17. McFeeters S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // International Journal of Remote Sensing. — 1996. — Vol. 17, №7. — P. 1425–1432. — DOI: 10.1080/01431169608948714. URL:https://doi.org/10.1080/01431169608948714

18. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium (NASA Goddard Space Flight Center). — 1974. — Vol. 1, Sect. A. — Paper A20. — NTRS ID 19740022614. — URL:https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614

19. Rikimaru A., Roy P.S., Miyatake S. Tropical forest cover density mapping // Tropical Ecology. — 2002. — Vol. 43, №1. — P. 39–47.

20. Pu B., Ginoux P., Guo H. et al. Retrieving the global distribution of the threshold of wind erosion from satellite data and implementing it into the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory land–atmosphere model (GFDL AM4.0/LM4.0) // Atmospheric Chemistry and Physics. 2020. Vol. 20, №1. P. 55–81. DOI: 10.5194/acp-20-55-2020. URL:https://doi.org/10.5194/acp-20-55-2020

21. Kurosaki Y., Mikami M. Threshold wind speed for dust emission in east Asia and its seasonal variations // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. — 2007. — Vol. 112. — D17202. — DOI: 10.1029/2006JD007988. — URL:https://doi.org/10.1029/2006JD007988

22. Theil H. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. I, II, III // Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen. — 1950. — Vol. 53. — P. 386–392, 521–525, 1397–1412.

23. Sen P.K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau // Journal of the American Statistical Association. — 1968. — Vol. 63, №324. — P. 1379–1389.

24. Mann H.B. Nonparametric tests against trend // Econometrica. — 1945. — Vol. 13, №3. — P. 245–259.

25. Saisana M., Saltelli A., Tarantola S. Uncertainty and sensitivity analysis techniques as tools for the quality assessment of composite indicators // Journal of the Royal Statistical Society. Series A (Statistics in Society). — 2005. — Vol. 168, №2. — P. 307–323.

26. Nardo M., Saisana M., Saltelli A., Tarantola S., Hoffmann A., Giovannini E. Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide. — Paris: OECD Publishing, 2008.

27. Jaccard P. The distribution of the flora in the alpine zone // New Phytologist. — 1912. — Vol. 11, №2. — P. 37–50. — DOI: 10.1111/j.1469-8137.1912.tb05611.x. URL:https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1912.tb05611.x

28. Uzbekistan assailed by cataclysmic sand and salt storm [Elektron resurs] // Eurasianet. — 2018. — 30 May (hodisa: 2018-yil 27-may). — URL: https://eurasianet.org/uzbekistan-assailed-by-cataclysmic-sand-and-salt-storm (murojaat sanasi: 2026-yil 25-oktabr)

29. IQAir. World Air Quality Report 2025. — Goldach, 2026. — 48 p.

30. Robinson W.S. Ecological correlations and the behavior of individuals // American Sociological Review. — 1950. — Vol. 15, №3. — P. 351–357.