Ilmiy tadqiqotlar va ularning yechimlari jurnali
Aoka guvohnoma № 323759 ISSN: 3060-4818

ATROF MUHIT IFLOSLANISHINI ANIQLASH VA BASHORAT QILISH JARAYONLARINI SONLI MODELLASHTIRISH VA DASTURIY MAJMUINI ISHLAB CHIQISH (QORAQALPOG'ISTON RESPUBLIKASI MISOLIDA)

Bimuratov Dauletmurat Murat uli
Toshkent shahrida Belarus-O'zbekiston qo'shma tarmoqlararo amaliy texnik kvalifikatsiya institute, Doktorant
dawka12321@gmail.com
https://doi.org/10.5281/zenodo.24015210

Annotatsiya. Maqolada Orol bo'yi va Qoraqalpog'iston Respublikasi hududida shang-to'zon vaqtida havoga ko'tarilgan aerozol zarrachalarining tarqalishini aniqlash va bashorat qilish masalasi ko'rib chiqilgan. Uch o'lchovli konvektiv-diffuziya tenglamasi aralashgan qatlam bo'yicha o'rtalashtirilib, emissiya, turbulent diffuziya va quruq cho'kishni hisobga oluvchi ikki o'lchovli modelga keltirilgan. Masala koordinata bo'yicha ajratish, konveksiya uchun TVD (van Leer limiteri) va diffuziya uchun oshkor sxema yordamida yechilgan; aniqligi tahliliy yechim bilan tekshirilgan (yaqinlashish tartibi 2 dan yuqori). Ishlab chiqilgan dasturiy majmua yordamida 36 soatlik shang-to'zon epizodi hisoblangan. Natijalarga ko'ra, kuchli shamolda aerozol 500 km dan ortiq masofaga tarqaladi, Nukus, Dashog'uz va Urganch yo'nalishida konsentratsiya shartli taqqoslash darajalaridan bir necha baravar oshadi. Natijalardan atrof muhit holatini baholashda va aholini oldindan ogohlantirish tizimlarini ishlab chiqishda foydalanish mumkin.
Kalit so'zlar: atrof muhit, havo ifloslanishi, aerozol, shang-to'zon, matematik modellashtirish, konvektiv-diffuziya tenglamasi, TVD sxema, emissiya, dasturiy majmua, Qoraqalpog'iston.

Abstract. The paper presents a numerical model and a software package for simulating dust-storm aerosol transport over the Aral Sea region and the Republic of Karakalpakstan. The three-dimensional advection-diffusion equation is averaged over the mixed layer, giving a two-dimensional model with wind-driven emission, turbulent diffusion and dry deposition. It is solved by an operator-splitting scheme with a TVD (van Leer limiter) advection step; the accuracy is verified against an analytical solution (observed order of convergence above 2). A 36-hour dust-storm episode is simulated and visualised as concentration and deposition maps. In a strong wind the aerosol cloud travels more than 500 km, and concentrations in the Nukus, Dashoguz and Urgench direction exceed the conventional reference levels several times.
Keywords: environment, air pollution, aerosol, dust storm, mathematical modelling, advection-diffusion equation, TVD scheme, emission, software package, Karakalpakstan.

KIRISH (ВВЕДЕНИЕ / INTRODUCTION)

Orol dengizining qurishi XX asr oxiri va XXI asr boshidagi eng yirik ekologik o'zgarishlardan biri hisoblanadi. 1960-yillarda taxminan 68 ming km² maydonni egallagan suv havzasi o'rnida Orolqum deb ataluvchi, tuz va mayda dispers changga boy yangi cho'l hosil bo'ldi [5, 6]. Qoraqalpog'iston Respublikasi

bu hududning bevosita qo'shnisi bo'lgani uchun kuchli shamol paytida ko'tarilgan changli-tuzli aerozollar aholi salomatligi, qishloq xo'jaligi va ekotizimlarga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Adabiyotlarda Orol tubidan yillik chang-tuz chiqarilishi o'nlab million tonnadan yuz million tonnagacha bo'lgan oraliqda baholanadi [6, 7].

Shang-to'zon jarayonlarini faqat o'lchovlar bilan kuzatish yetarli emas: kuzatuv postlari kam, jarayon esa katta maydonda va tez o'zgaradi. Shu sababli aerozol tarqalishini matematik modellashtirish va sonli tajriba o'tkazish bir vaqtning o'zida ikki vazifani hal qiladi: (a) ifloslanish manbalari va maydonini aniqlash, (b) uning keyingi soatlardagi rivojini bashorat qilish. Atmosferadagi zararli moddalar ko'chishining konvektiv-diffuziya modellari G.I. Marchuk, M.E. Berlyand maktablarida asos solingan bo'lib [1, 2], hozirgi vaqtda ular hisoblash matematikasi usullari va dasturiy majmualar bilan boyitilib, hududiy masalalarda qo'llanilmoqda.

Tadqiqot maqsadi — Qoraqalpog'iston Respublikasi misolida shang-to'zon vaqtida aerozolning tarqalishini tavsiflovchi matematik model, uni yechishning sonli algoritmi va vizuallashtirishni o'z ichiga olgan dasturiy majmuani ishlab chiqishdir. Vazifalar: (1) modelni qurish; (2) sonli sxemani tanlash va uning aniqligini tekshirish; (3) dasturiy majmuani yaratish; (4) shamol tezligining turli stsenariylarida hisoblash tajribasi o'tkazish.

ADABIYOTLAR TAHLILI VA METOD (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И МЕТОД / LITERATURE REVIEW AND METHODS)

Adabiyotlar tahlili

Atmosferada zararli moddalar ko'chishining konvektiv-diffuziya modellari G.I. Marchuk va M.E. Berlyand maktablarida asos solingan [1, 2]; atmosfera jarayonlarining fizik-kimyoviy asoslari [3] da bayon etilgan. Shang-to'zon emissiyasini tavsiflashda Marticorena va Bergametti taklif etgan tuproqdan chang ko'tarilish sxemasi qo'llaniladi [4]. Orol dengizining qurishi oqibatlari va Orol tubidan chang-tuz chiqarilishi [5–7] ishlarda o'rganilgan. Konveksiya masalalarini yechishda yuqori aniqlikdagi TVD sxemalar [8, 10], murakkab jarayonlarni qadamma-qadam hisoblashda esa fizik jarayonlar bo'yicha ajratish usuli [9] qo'llaniladi. Ushbu ishda sanab o'tilgan yondashuvlar Qoraqalpog'iston Respublikasi hududiga tatbiq etilib, yagona dasturiy majmuaga birlashtirilgan.

Metod

Masalaning qo'yilishi va matematik model

Aerozol zarrachalari konsentratsiyasi C(x, y, z, t) (mkg/m³) quyidagi uch o'lchovli konvektiv-diffuziya tenglamasi bilan ifodalanadi [1,3]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u\frac{\partial C}{\partial x} + v\frac{\partial C}{\partial y} + (w - w_g)\frac{\partial C}{\partial z} + \sigma C = \mu\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left[\kappa(z)\frac{\partial C}{\partial z}\right] + \sum_k Q_k\,\chi(x,y,z,t)\,\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_k) \qquad (1)$$

bu yerda u, v, w — shamol tezligi tashkil etuvchilari, m/s; w_g — zarrachalarning gravitatsion cho'kish tezligi; μ — gorizontal turbulent diffuziya koeffitsiyenti; κ(z) — vertikal turbulent diffuziya koeffitsiyenti (balandlikka bog'liq); σ — zarrachalarning boshqa yo'qolish tezligi (yuvilish, koagulyatsiya), 1/s; Q_k — k-chi manba quvvati; χ(x, y, z, t) — manbaning faollik funksiyasi (shamol bo'sag'adan oshganda χ = 1,

aks holda $\chi = 0$); $\delta(r - r_k)$ — Dirak delta-funksiyasi, $r = (x, y, z)$, r_k — k-chi manba koordinatasi. Boshlang'ich shart: $C(x, y, z, 0) = C_0(x, y, z)$ (hisoblashlarda toza havo, $C_0 = 0$). Yer sirtida ($z = 0$) manba va quruq cho'kish quyidagi shart bilan beriladi:

$$\kappa(z)\frac{\partial C}{\partial z}|_{z=0} = v_d C - F(x, y, t), \qquad \frac{\partial C}{\partial z}|_{z=H} = 0 \qquad (2)$$

bu yerda F — sirtdan ko'tarilayotgan aerozolning vertikal oqimi (mkg/m²·s), v_d — quruq cho'kish tezligi, H — hisoblash sohasining yuqori chegarasi. Hisoblash sohasining yon chegaralarida kirish tomonida $C = 0$, chiqish tomonida $\partial C/\partial n = 0$ sharti qabul qilinadi.

Shang-to'zon vaqtida zarrachalar chuqur aralashgan atmosfera chegara qatlamida ko'tarilgani uchun (2) shart bilan (1) tenglama balandligi h bo'lgan aralashgan qatlam bo'yicha o'rtalashtiriladi; maydon manbasi (Orolning quruq tubi) to'rning har bir katagidagi nuqtaviy manbalar yig'indisi $\Sigma\, Q_k\, \chi\, \delta(r - r_k)$ sifatida, ya'ni F(x, y, t) ko'rinishida beriladi. Natijada gorizontal tekislikdagi ikki o'lchovli model hosil bo'ladi:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u\frac{\partial C}{\partial x} + v\frac{\partial C}{\partial y} + \lambda C = \mu\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}\right) + \frac{F(x, y, t)}{h} \qquad (3)$$

$$\lambda = \sigma + \frac{v_d}{h} \qquad (4)$$

Aerozol emissiyasi (deflyatsiya) Gillette va Marticorena-Bergametti sxemasi ko'rinishida olinadi [4]. Sirt ishqalanish tezligi $u_* = \kappa\, U_{10}$ (κ — sirt g'adir-budurligini hisobga oluvchi empirik koeffitsiyent), emissiya faqat $u_* > u_{*t}$ sharti bajarilganda yuz beradi:

$$F(x, y, t) = K_0\, S(x, y)\, u_*^3 (1 + R)(1 - R^2), \qquad R = \frac{u_{*t}}{u_*} \qquad (5)$$

bu yerda S(x, y) [0, 1] — hududning deflyatsiyaga moyilligini ifodalovchi manba funksiyasi (Orolning quruq tubi, Mo'ynoq atrofi, Amudaryo deltasidagi sho'rxoklar, g'arbiy qirg'oq uchun alohida berilgan), K_0 — emissiya koeffitsiyenti, u_{*t} — chang ko'tarilish bo'sag'asi. Shamol stsenariysi sovuq front o'tishini aks ettiradi: tezlik vaqt bo'yicha Gauss ko'rinishidagi impuls bilan o'zgaradi, yo'nalishi esa shimoliy-g'arbdan shimoliy-sharqqa buriladi:

$$U_{10}(t) = U_b + (U_{max} - U_b)\exp\left[-\left(\frac{t - t_p}{\tau}\right)^2\right],$$

$$u = -U_{10}\sin\theta(t), \qquad v = -U_{10}\cos\theta(t) \qquad (6)$$

bu yerda $\theta(t)$ — shamol esadigan tomon (azimut). Tadqiqotning amaliy natijasi sifatida sirtga cho'kkan aerozol massasi M(x, y) ham hisoblanadi:

$$M(x, y) = \int_0^T v_d\, C(x, y, t)\, dt \qquad (7)$$

Sonli usul

Hisoblash sohasi 500 × 620 km o'lchamli to'g'ri to'rtburchak bo'lib (taxminan 57–63° sharqiy uzunlik, 41–46,6° shimoliy kenglik), $\Delta x = \Delta y = 4$ km qadamli to'r (125 × 155 tugun) bilan qoplangan. Vaqt qadami $\Delta t = 120$ s. (3) tenglama fizik jarayonlar bo'yicha ajratish usuli bilan yechiladi [9]:

$$C^{n+1} = L_R L_D L_y L_x C^n \qquad (8)$$

bu yerda L_x, L_y — koordinatalar bo'yicha konveksiya, L_D — diffuziya, L_R — manba va cho'kish operatorlari. Konveksiya uchun yuqori aniqlikdagi TVD sxema qo'llaniladi [8, 10]; u tebranishlarsiz,

manfiy bo'lmagan yechim beradi, bu aerozol konsentratsiyasi uchun muhim. Katta tezlikli shamolda birinchi tartibli sxemaning sun'iy diffuziyasi ($u\Delta x/2 \approx 3\cdot10^4$ m²/s) haqiqiy turbulent diffuziyadan ($K \approx 2\cdot10^3$ m²/s) ancha katta bo'lardi, shuning uchun tartibi yuqori sxema tanlandi. $u > 0$ bo'lganda tugunlararo oqim

$$F_{i+1/2} = \nu\left[C_i + \frac{1}{2}(1-\nu)\psi(r_i)(C_{i+1} - C_i)\right], \quad \nu = \frac{u\Delta t}{\Delta x}, \quad \psi(r) = \frac{r + |r|}{1 + |r|} \qquad (9)$$

ko'rinishida yoziladi, $r_i = (C_i - C_{i-1})/(C_{i+1} - C_i)$. Sxema Kuran sharti $|\nu| \le 1$ bajarilganda turg'un; hisoblashlarda maksimal Kuran soni 0,45 ga teng. Diffuziya operatori oshkor besh nuqtali sxema bilan yaqinlashtiriladi, turg'unlik sharti $K\Delta t/\Delta x^2 \le 1/4$ bajariladi (hisoblashda 0,015). Manba va cho'kish bosqichi yarim oshkormas yoziladi:

$$C^* = \frac{C + \Delta t\, F/h}{1 + \Delta t\, \lambda} \qquad (10)$$

bu har qanday Δt da manfiy bo'lmaslikni saqlaydi.

Sonli sxema aniqligini tekshirish metodikasi

Sxema aniqligi tahliliy yechimga ega bo'lgan sinov masalasida tekshirildi: bir jinsli shamol ($U = 5$ m/s) va diffuziya ($K = 5000$ m²/s) sharoitida boshlang'ich nuqtaviy manbaning Gauss ko'rinishidagi yechimi

$$C(x, y, t) = \frac{M}{4\pi\mu t}\exp\left\{-\frac{[x - x_0 - U(t - t_0)]^2 + (y - y_0)^2}{4\mu t}\right\} \qquad (11)$$

bilan 12 soatlik hisob natijasi solishtirildi. Xato nisbiy L_2 normada baholandi; hisoblash to'r qadami $\Delta x = 10$; 5 va 2,5 km bo'lganda bajarildi, yaqinlashish tartibi $p = \log_2(E_1/E_2)$ formula bilan topildi (E_1, E_2 — ketma-ket ikki to'rdagi xatolar).

Dasturiy majmua

Dasturiy majmua (shartli nomi AEROZOL-QR) Python tilida NumPy va Matplotlib kutubxonalari asosida yaratilgan va beshta modul bilan ifodalanadi: (1) geoaxborot moduli — to'r va koordinatalar o'tkazgichi, manba funksiyasi S(x, y); (2) meteorologik modul — shamol stsenariysi (6); (3) emissiya moduli — (5) formula; (4) transport yechuvchisi — (8)–(10) sxema; (5) postprotsessor — konsentratsiya va cho'kish xaritalari, aholi punktlaridagi vaqt qatorlari, stsenariylarni solishtirish. Dastur kodi aeroZol_model.py (model va sxemalar) va make_figures.py (hisoblash tajribasi va vizuallashtirish) fayllarida berilgan.

Majmuaning asosiy ish tartibi: kirish ma'lumotlarini o'qish → to'r va S(x, y) ni qurish → vaqt bo'yicha tsikl (shamolni hisoblash → emissiya → konveksiya → diffuziya → manba va cho'kish → natijalarni yozish) → vizuallashtirish. «Aniqlash» bosqichi uchun majmuada teskari masala ko'zda tutilgan: kuzatuv ma'lumotlari C_k^{obs} bo'yicha emissiya koeffitsiyenti quyidagi funksionalning minimumidan topiladi:

$$J(K_0) = \sum_k \left[C(x_k, y_k, t_k; K_0) - C_k^{obs}\right]^2 \to \min \qquad (12)$$

Bunda meteorologik ma'lumotlar sifatida ERA5 qayta tahlili, kuzatuv ma'lumotlari sifatida Gidrometeorologiya xizmati postlari va sun'iy yo'ldosh aerozol optik qalinligi (masalan, MODIS) ishlatilishi mumkin.

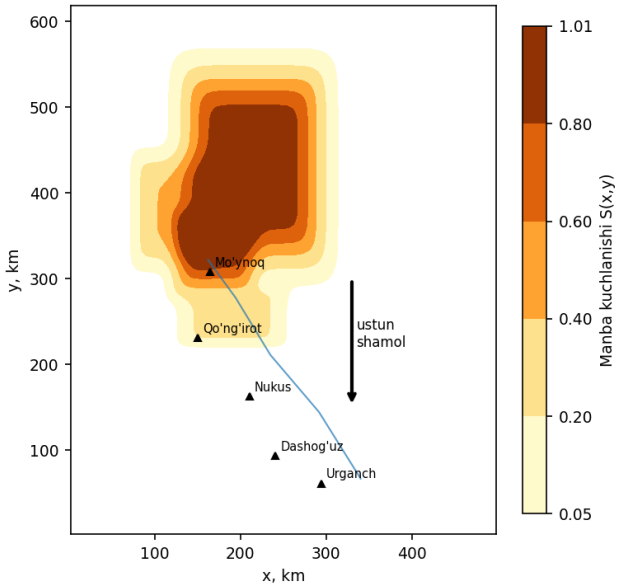
Hisoblash tajribasining parametrlari

Tajriba parametrlari 1-jadvalda keltirilgan. Hududning joylashuvi, manbalar va shaharlar 1-rasmda (sxema) ko'rsatilgan.

1-jadval. Hisoblash tajribasi parametrlari

Parametr	Qiymat
To'r / qadam	125 × 155 tugun, $\Delta x = \Delta y = 4$ km
Vaqt qadami, davomiyligi	$\Delta t = 120$ s, $T = 36$ soat
Gorizontal diffuziya koeffitsiyenti μ	2000 m²/s
Aralashgan qatlam balandligi h	1500 m
Quruq cho'kish tezligi v_d (PM10)	0,01 m/s
Chang ko'tarilish bo'sag'asi u_{*t}, koeffitsiyent κ	0,35 m/s; 0,04
Emissiya koeffitsiyenti K_0	$1{,}5 \cdot 10^3$ (shartli)
Shamol: U_b, U_max, t_p, τ	4 m/s; 15 m/s; 12 soat; 6 soat
Shamol yo'nalishi	340° (shimoli-g'arb) dan 20° (shimoli-sharq) gacha

1-rasm. Hisoblash sohasi va deflyatsiya manbalari (sxema)



MUHOKAMA (ОБСУЖДЕНИЕ / DISCUSSION)

Muhokama keyingi bo'limda keltirilgan hisoblash natijalariga asoslanadi. Olingan natijalar aerozol tarqalishining asosiy ko'rsatkichlarini emissiyaning shamol tezligiga keskin bog'liqligi belgilashini ko'rsatadi. Emissiya faqat shamol tezligi bo'sag'a qiymatidan (8,75 m/s) oshgan oraliqda, ya'ni taxminan 6,5–17,5 soat davomida yuz berdi. (5) formuladagi u^{*3} ko'paytuvchisi va bo'sag'a sharti birgalikda U_max ning 11 dan 19 m/s gacha oshishi Nukusdagi maksimal konsentratsiyani 680 dan 5400 mkg/m³ gacha, ya'ni taxminan 8 baravar oshirishiga olib keldi. Demak, amaliy bashoratda eng muhim kirish ma'lumoti

shamol tezligining aniq prognozi bo'lib, uning bir necha m/s xatosi konsentratsiya bahosida bir necha baravar farq beradi.

Cho'qqi vaqtlarining shimoldan janubga siljishi (Mo'ynoqda taxminan 14, Urganchda taxminan 19 soat) aerozol bulutining ko'chishini aks ettiradi: janubdagi aholi punktlariga bulut manba hududidan bir necha soat kechikib yetib keladi. Bu bashorat nuqtai nazaridan muhim, chunki shamol kuchaygandan so'ng Nukus, Dashog'uz va Urganch yo'nalishidagi aholini ogohlantirish uchun vaqt zaxirasi mavjud. Cho'kish maydonining Nukus atrofida maksimumga ega bo'lishi (taxminan 1,3–1,4 g/m²) shu hududdagi qishloq xo'jaligi yerlari tuz va chang ta'siriga eng ko'p duchor bo'lishi mumkinligini ko'rsatadi.

Sonli usul tanlovi o'zini oqladi. Birinchi tartibli sxemaning sun'iy diffuziyasi ($\approx 3\cdot10^4$ m²/s) haqiqiy turbulent diffuziyadan ($\approx 2\cdot10^3$ m²/s) taxminan 15 baravar katta bo'lardi, TVD sxema esa tebranishlarsiz va manfiy bo'lmagan yechim beradi hamda sinov masalasida 2 dan yuqori yaqinlashish tartibini ko'rsatdi. Shuni qayd etish kerakki, 2,4–2,7 tartib silliq (Gauss) yechim uchun olingan; keskin gradientli real maydonlarda limiter ta'sirida lokal aniqlik pasayishi mumkin.

Cheklov va keyingi ishlar. Keltirilgan sonli natijalar model imkoniyatini namoyish etuvchi hisoblash tajribasi bo'lib, parametrlar (K_0, u_{*t}, h, v_d) kuzatuv ma'lumotlari bo'yicha hali kalibrlanmagan. Keyingi bosqichda: (a) ERA5 shamol maydonlari va orografiyani kiritish; (b) uch o'lchovli variantga o'tish; (c) (12) funksional bo'yicha emissiya parametrlarini kuzatuvlardan aniqlash; (d) turli fraksiyalar (PM2.5, PM10, tuz) uchun alohida hisoblash.

Natijalarni miqdoriy bashorat sifatida talqin qilishda yana quyidagilarni hisobga olish kerak. Birinchidan, 150 va 500 mkg/m³ darajalari taqqoslash uchun shartli olingan; amaldagi me'yoriy qiymatlar SanQvaN talablari bo'yicha aniqlanishi kerak. Ikkinchidan, 19 m/s stsenariyda bulut hisoblash sohasidan chiqib ketgani uchun yuza ko'rsatkichlari quyi baho hisoblanadi. Uchinchidan, 36 soat davomida chiqarilgan jami massa (taxminan $2,6\cdot10^5$ t) yillik baholarga [6, 7] (o'nlab–yuz million tonna) nisbatan taxminan 0,3–3 % ni tashkil etadi; bu faqat tartib jihatdan ziddiyat yo'qligini bildiradi, chunki emissiya koeffitsiyenti shartli. Shu sababli hozirgi bosqichda eng ishonchli xulosalar — hodisalar ketma-ketligi, bulutning ko'chish yo'nalishi va stsenariylarning nisbiy farqi.

NATIJALAR (РЕЗУЛЬТАТЫ / RESULTS)

Sonli sxemaning aniqligi

2-jadvalda nisbiy L_2 xato keltirilgan: to'r qadami ikki marta kamaytirilganda xato taxminan 6 baravar kamaymoqda, ya'ni yaqinlashish tartibi 2,4–2,7 ni tashkil etadi.

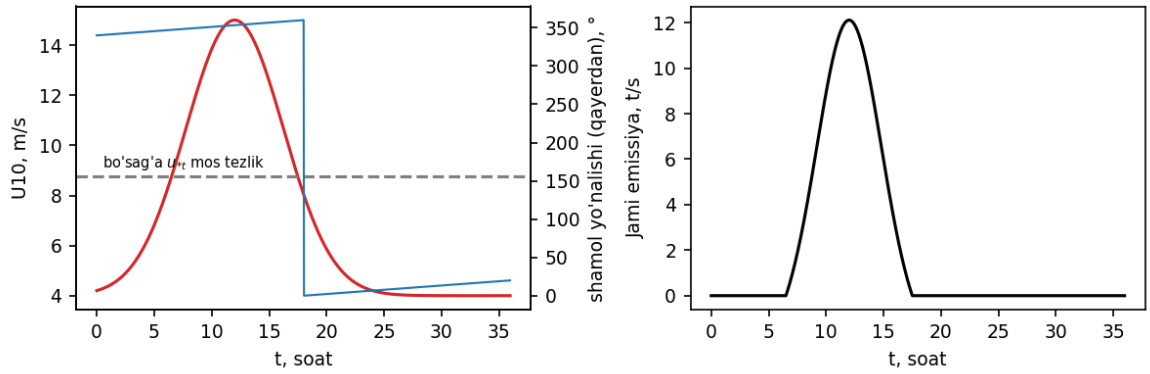
2-jadval. Sonli yechimning tahliliy yechimdan nisbiy xatosi

Δx, km	Nisbiy L_2 xato	Tartib
10	0,1041	—
5	0,0191	2,45
2,5	0,0030	2,67

Shang-to'zon epizodining hisoblash natijalari

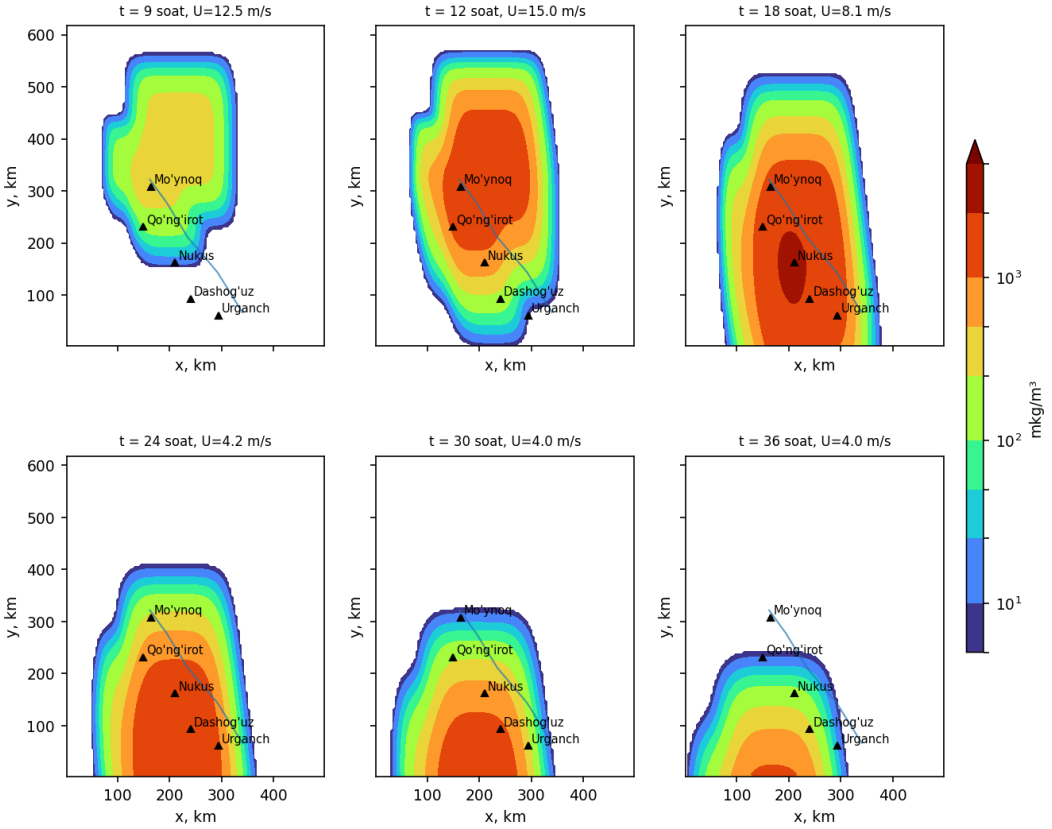
Shamol tezligi 8,75 m/s dan oshganda ($u_* > u_{*t}$) emissiya boshlanadi; stsenariyda bu hol taxminan 6,5-soatdan 17,5-soatgacha davom etadi (2-rasm). 36 soatlik epizodda jami chiqarilgan aerozol massasi hisoblash bo'yicha taxminan $2,6\cdot10^5$ tonnani tashkil etdi.

2-rasm. Meteorologik stsenariy va aerozol emissiyasi



3-rasmda aerozol konsentratsiyasi maydonining vaqt bo'yicha rivoji ko'rsatilgan. 9-soatda yuqori konsentratsiya Orolning quruq tubi ustida shakllanadi; 12–18-soatlarda shamol cho'qqisida va uning yo'nalishi o'zgarishi natijasida zarrachalar janubga — Mo'ynoq, Qo'ng'irot, Nukus va Dashog'uz yo'nalishida siljiydi, 24-soatdan keyin esa manba o'chgach, bulut shamol bilan janubga ko'chib, asta-sekin so'nadi. Aerozol bulutining shimoldan janubga uzunligi 500 km dan oshadi va hisoblash sohasining janubiy chegarasigacha yetadi.

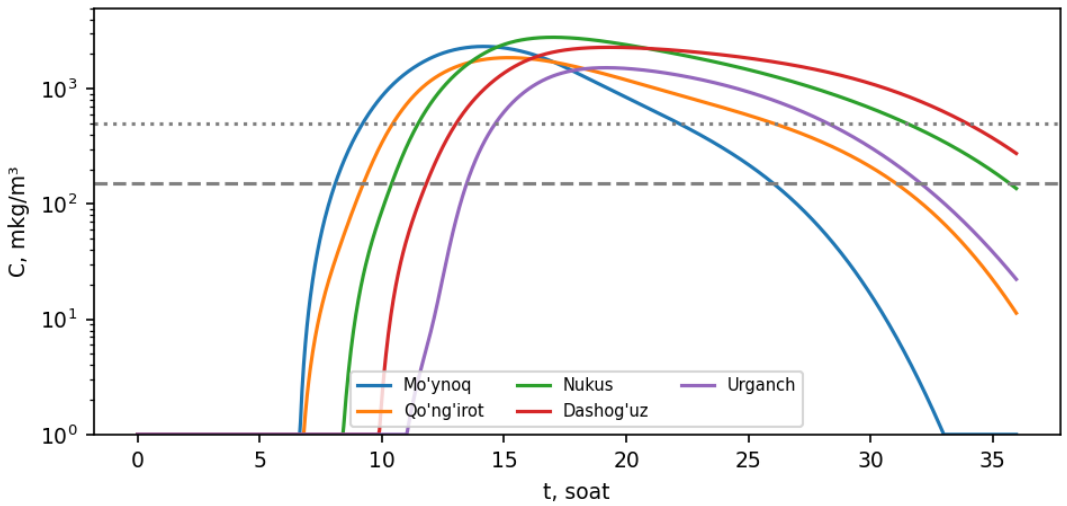
3-rasm. Aerozol (PM10) konsentratsiyasi maydoni, mkg/m³



4-rasmda aholi punktlaridagi konsentratsiyaning vaqt bo'yicha o'zgarishi berilgan. Maksimumlar: Mo'ynoq — 2330 mkg/m³ (14,2-soat), Qo'ng'irot — 1860 (15,2-soat), Nukus — 2800 (17,0-soat), Dashog'uz — 2290 (19,3-soat), Urganch — 1520 mkg/m³ (19,2-soat). Taqqoslash uchun gorizontal

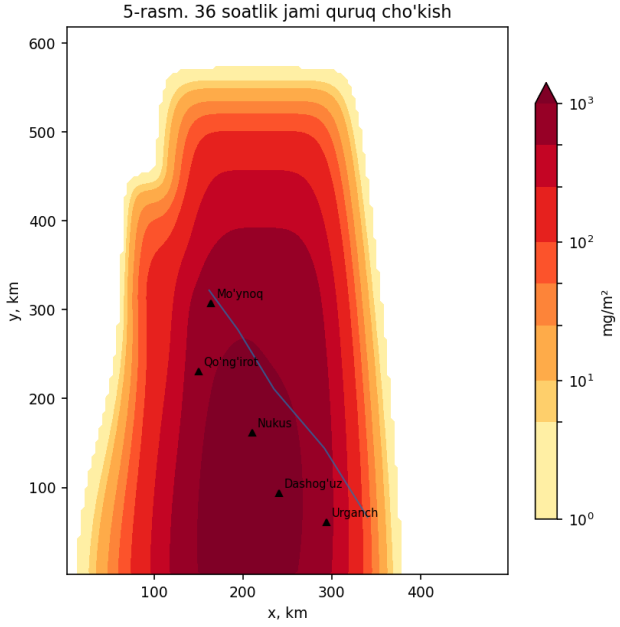
chiziqlarda shartli 150 va 500 mkg/m³ darajalar ko'rsatilgan (amaldagi me'yoriy qiymatlar SanQvaN talablaridan aniqlanishi kerak). Cho'qqi vaqtining shimoldan janubga kechikishi (Mo'ynoqda 14, Urganchda 19 soat) bulutning ko'chish tezligini baholash va aholini oldindan ogohlantirish imkonini beradi.

4-rasm. Aholi punktlarida aerozol konsentratsiyasining o'zgarishi



5-rasmda 36 soat davomida yer sirtiga cho'kkan aerozol massasi (7-formula) ko'rsatilgan. Eng yuqori qiymatlar Nukus atrofida 1,3 g/m² ga yaqin (maksimum 1,4 g/m²), bu qishloq xo'jaligi yerlariga tuz va changning to'planishi xavfini ko'rsatadi.

5-rasm. 36 soatlik jami quruq cho'kish



Shamol tezligiga sezgirlik tahlili

Sezgirlik tahlili uchun shamolning maksimal tezligi U_{max} = 11, 15 va 19 m/s bo'lgan uch stsenariy hisoblandi (6-rasm, 3-jadval). Shamol tezligi 11 m/s dan 19 m/s gacha oshganda Nukus shahridagi maksimal konsentratsiya 680 dan 5400 mkg/m³ gacha, ya'ni 8 baravar ortadi. Bu emissiyaning shamol

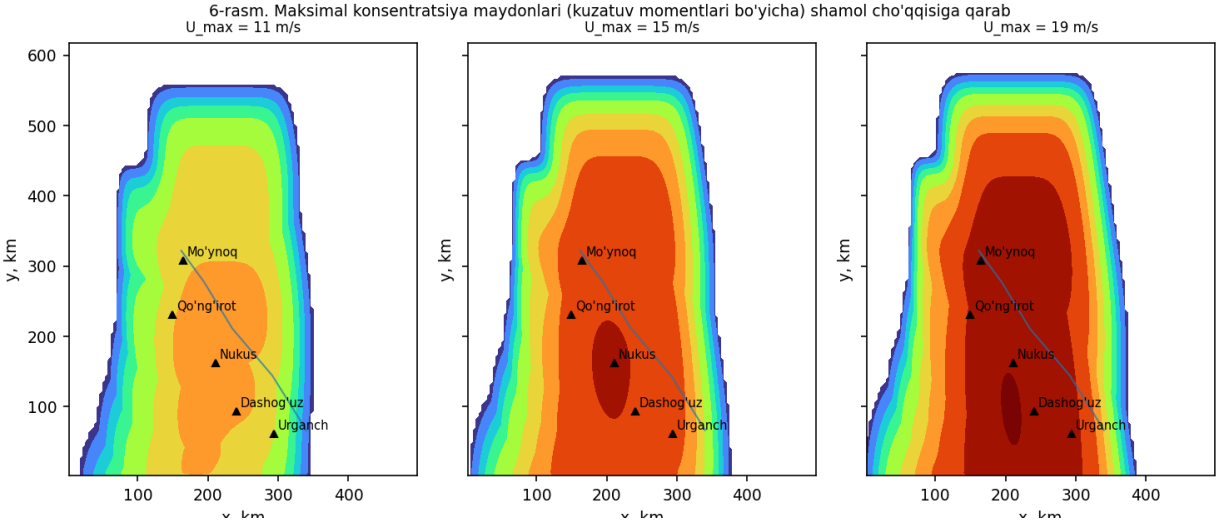
tezligi bo'yicha kubik bog'liqligi (5) ning natijasidir: kuchsiz shamol farqi ham ifloslanish darajasiga keskin ta'sir qiladi.

3-jadval. Shamol tezligi stsenariylarining solishtirmasi

U_{max}, m/s	S(C>150), ming km²	S(C>500), ming km²	C_{max}	Nukus	Urganch
11	93	30	723	677	247
15	126	97	2755	2796	1522
19	137	114	5138	5404	3363

Eslatma: konsentratsiyalar mkg/m³ da; S — olti oraliq lahzadagi maksimal maydon bo'yicha hisoblangan yuza; 19 m/s da bulut hisoblash sohasidan chiqib ketgani uchun yuzalar quyi baho hisoblanadi.

6-rasm. Maksimal konsentratsiya maydonlari (kuzatuv momentlari bo'yicha) shamol cho'qqisiga qarab



XULOSA (ЗАКЛЮЧЕНИЕ / CONCLUSION)

1. Orol bo'yi va Qoraqalpog'iston hududida shang-to'zon vaqtida aerozol ko'chishining uch o'lchovli konvektiv-diffuziya modeli qurilib, aralashgan qatlam bo'yicha o'rtalashtirilgan ikki o'lchovli shakli olingan; shamolga bog'liq emissiya, turbulent diffuziya va quruq cho'kish hisobga olingan.

2. Konveksiya uchun TVD sxemasi, diffuziya uchun oshkor sxema va manba uchun yarim oshkormas bosqichdan iborat ajratish algoritmi ishlab chiqilgan; tahliliy yechim bilan solishtirishda yaqinlashish tartibi 2,4–2,7 ekani tasdiqlandi.

3. AEROZOL-QR dasturiy majmuasi yaratilib, aerozolning tarqalish xaritalari, cho'kish maydoni va aholi punktlaridagi vaqt qatorlari vizuallashtirildi.

4. 36 soatlik stsenariyda aerozol buluti 500 km dan ortiq masofaga tarqaladi, Nukus va Dashog'uz yo'nalishida konsentratsiya bir necha mg/m³ ga yetadi; shamol tezligi 11 dan 19 m/s gacha oshsa, Nukusdagi maksimum 8 baravar ortadi.

ADABIYOTLAR RO'YXATI (СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ)

1. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука, 1982.

2. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985.

3. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. 2nd ed. — Wiley, 2006.

4. Marticorena B., Bergametti G. Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme // J. Geophys. Res. — 1995. — Vol. 100(D8). — P. 16415–16430.

5. Micklin P. The Aral Sea disaster // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. — 2007. — Vol. 35. — P. 47–72.

6. 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.

7. Issanova G., Abuduwaili J. Aeolian Processes as Dust Storms in the Deserts of Central Asia and Kazakhstan. — Springer, 2017.

8. van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme. V // J. Comput. Phys. — 1979. — Vol. 32. — P. 101–136.

9. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1989.

10. LeVeque R.J. Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems. — Cambridge Univ. Press, 2002.

REFERENCES

1. Marchuk G.I. Matematicheskoe modelirovanie v probleme okruzhayushchey sredy [Mathematical modeling in the environmental problem]. – Moscow: Nauka, 1982.
2. Berlyand M.E. Prognoz i regulirovanie zagryazneniya atmosfery [Forecasting and regulation of air pollution]. – Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985.
3. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. 2nd ed. — Wiley, 2006.
4. Marticorena B., Bergametti G. Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme // J. Geophys. Res. — 1995. — Vol. 100(D8). — P. 16415–16430.
5. Micklin P. The Aral Sea disaster // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. — 2007. — Vol. 35. — P. 47–72.
6. 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.
7. Issanova G., Abuduwaili J. Aeolian Processes as Dust Storms in the Deserts of Central Asia and Kazakhstan. — Springer, 2017.
8. van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme. V // J. Comput. Phys. — 1979. — Vol. 32. — P. 101–136.
9. Samarskiy A.A. Teoriya raznostnykh skhem [Theory of difference schemes]. – Moscow: Nauka, 1989.
10. LeVeque R.J. Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems. — Cambridge Univ. Press, 2002.