

**RAQAMLI TEXNOLOGIYALAR VA SUN'YIY INTELLEKTNI  
RIVOJLANTIRISH ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI  
ILMIY DARAJALAR BERUVCHI DSc.13.30.12.2021.T.142.01 RAQAMLI  
ILMIY KENGASH**

---

**RAQAMLI TEXNOLOGIYALAR VA SUN'YIY INTELLEKTNI  
RIVOJLANTIRISH ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI**

**UBAYDULLAYEV MALIK SHAVKATOVICH**

**ATMOSFERADA RADIOAKTIV MODDALARNING MEZOMASSHTABLI  
KO'CHISHI VA DIFFUZIYASI JARAYONLARINI MODELLASHTIRISH**

05.01.07 – Matematik modellashtirish. Sonli usullar va dasturlar majmui

**TEXNIKA FANLARI BO'YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)  
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

**Toshkent – 2025**

**Texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati  
mundarijasи**

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

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

**Ubaydullaev Malik Shavkatovich**

Atmosferada radioaktiv moddalarning mezomasshtabli ko‘chishi va diffuziyasi  
jarayonlarini modellashtirish ..... 3

**Убайдуллаев Малик Шавкатович**

Моделирование мезомасштабных процессов атмосферного переноса и  
диффузии радиоактивных примесей ..... 21

**Ubaydullaev Malik Shavkatovich**

Modeling of mesoscale processes of atmospheric transport and diffusion of  
radioactive impurities ..... 39

**E’lon qilingan ishlar ro‘yxati**

Список опубликованных работ

List of published works ..... 42

**RAQAMLI TEXNOLOGIYALAR VA SUN'YIY INTELLEKTNI  
RIVOJLANTIRISH ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI  
ILMIY DARAJALAR BERUVCHI DSc.13.30.12.2021.T.142.01 RAQAMLI  
ILMIY KENGASH**

---

**RAQAMLI TEXNOLOGIYALAR VA SUN'YIY INTELLEKTNI  
RIVOJLANTIRISH ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI**

**UBAYDULLAYEV MALIK SHAVKATOVICH**

**ATMOSFERADA RADIOAKTIV MODDALARNING MEZOMASSHTABLI  
KO'CHISHI VA DIFFUZIYASI JARAYONLARINI MODELLASHTIRISH**

05.01.07 – Matematik modellashtirish. Sonli usullar va dasturlar majmui

**TEXNIKA FANLARI BO'YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)  
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

**Toshkent – 2025**

Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.3.PhD/T4871 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Raqamli texnologiyalar va sun'iy intellektni rivojlantirish ilmiy-tadqiqot institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida ([www.airi.uz](http://www.airi.uz)) va "Ziyonet" Axborot ta'lim portalida ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)) joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbar:**

**Axmedov Dilshot Dilmuradovich**

texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), k.i.x.

**Rasmiy opponentlar:**

**Eshmatov Baxtiyor Xasanovich**

fizika-matematika fanlari doktori, dotsent

**Shafiyev Tursun Rustamovich**

texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), dotsent

**Yetakchi tashkilot:**

**Qarshi davlat universiteti**

Dissertatsiya himoyasi Raqamli texnologiyalar va sun'iy intellektni rivojlantirish ilmiy-tadqiqot instituti huzuridagi DSc.13.30.12.2021.T.142.01 raqamli Ilmiy kengashning 2025-yil "03" oktabz soat 14:00 dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100125, Toshkent shahri, M. Ulug'bek tuman, Bo'z-2 mavzesi, 17A uy. Tel.: (+99871) 263-41-98; e-mail: [info@airi.uz](mailto:info@airi.uz)).

Dissertatsiya bilan Raqamli texnologiyalar va sun'iy intellektni rivojlantirish ilmiy-tadqiqot institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (61-raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100125, Toshkent shahri, M. Ulug'bek tuman, Bo'z-2 mavzesi, 17A uy. Tel.: (+99871) 263-41-98; e-mail: [info@airi.uz](mailto:info@airi.uz)).

Dissertatsiya avtoreferati 2025-yil "17" sentabz kunida tarqatildi.  
(2025-yil "12" sentabz dagi 16 raqamli reestr bayonnomasi.)



**N.Ravshanov**

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash raisi,  
texnika fanlari doktori, professor

**F.M.Nuraliyev**

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash ilmiy kotibi,  
texnika fanlari doktori, professor

**E.Sh.Nazirova**

Ilmiy darajalar beruvchi  
ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi,  
texnika fanlari doktori, professor

## **KIRISH (falsafa fan doktori (Phd) dissertatsiyasining annotatsiyasi)**

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbliji va zarurati.** Jahonda atmosferada radionuklidlarning texnogen chiqindilarini tarqalish jarayonlarini matematik modellashtirish masalalariga katta e'tibor qaratilmoqda. Yigirmaga yaqini jiddiy yoki halokatli oqibatlarga olib kelgan yuzdan ortiq muhim hodisalardan iborat to'plangan jahon tarixi radioaktiv moddalarning favqulodda chiqindilari tarqalishining xususiyati va ko'lamini o'z vaqtida bashorat qilish va aniq baholashning g'oyat muhimligini ta'kidlaydi. Ushbu ilmiy yo'nalishga qiziqish radioaktiv ifloslanishning uzoq muddatli ekologik va ijtimoiy-iqtisodiy oqibatlarini boshqarish samaradorligini oshirish zarurati, shuningdek, xavflarni tezkor baholash va birinchi navbatda aholi hayoti va salomatligiga yetkaziladigan zararni kamaytirishga bo'lgan ehtiyoj bilan bog'liq. Atmosferada radioaktiv moddalarning ko'chishi va diffuziyasining mezomasshtabli jarayonlarini kompyuterda modellashtirish uchun matematik va dasturiy ta'minotni takomillashtirishga yo'naltirilgan ilmiy tadqiqotlarning dolzarbliji, ayniqsa, AQSH, Fransiya, Buyuk Britaniya, Yaponiya, Janubiy Koreya, Xitoy, Rossiya, Belarus, Ukraina va boshqa yadro energetikasi rivojlangan mamlakatlarda yuqori hisoblanadi.

Butun dunyoda jarayonga ta'sir etuvchi omillarning murakkab majmuini hisobga olgan holda, atmosferaning chegaraviy qatlamida radioaktiv moddalarning texnogen chiqindilari konsentratsiyalari taqsimotini bashoratlash, tahlil qilish va baholash uchun matematik modellar, hisoblash algoritmlari va dasturiy majmualarni ishlab chiqishga yo'naltirilgan maqsadli tadqiqotlar olib borilmoqda. Ushbu tadqiqotlar natijalari atmosferada radioaktiv ifloslanishlarning tarqalishining fizik qonuniyatlari va mexanizmlarini tushunishning sifat jihatidan yangi darajasini ta'minlashga qodir bo'lib, bu ekologik monitoring maqsad va vazifalari uchun muhim ahamiyat kasb etadi.

Mamlakatimizda atom energiyasi ishlab chiqarish milliy infratuzilmasini rivojlantirish loyihasini amalga oshirish munosabati bilan ehtimoliy favqulodda chiqindilar xavfi va oqibatlarini baholashning zamonaviy vositalarini yaratish zarurati yuzaga kelmoqda. Xususan, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining "2019 - 2029-yillarda O'zbekiston Respublikada atom energetikasini rivojlantirish Konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida"gi Qarorida "O'zbekiston Respublikasi qonunchiligiga muvofiq milliy yadro-energetika dasturini rivojlantirish munosabati bilan atrof-muhitni muhofaza qilish va radiatsiyadan himoya qilish sohasidagi chora-tadbirlarni amalga oshirish" ta'kidlangan bo'lsa, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining "2022 - 2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi Farmonida "...atrof-muhitni kuzatish, uning ifloslanish darajasini prognoz qilish, davlat ekologik nazoratini doimiy ravishda axborot bilan ta'minlash, ifloslantiruvchi manbalarning holati va ularning atrof-muhitga ta'siri monitoringini amalga oshirish..." nazarda tutilgan vazifalarning muvaffaqiyatli bajarilishi radiatsiyaviy xavfsizlikning sanitariya me'yorlarini tezkor nazorat qilish, ekologik vaziyat sharoitlarini bashoratlash va texnogen ifloslanish oqibatida atrof-muhitga salbiy ta'sir ko'rsatish xavfi to'g'risida o'z vaqtida ogohlantirish hisobiga ekologik xizmatlar faoliyati samaradorligini

oshirishga yo‘naltirilgan matematik modellashtirish usullarini yanada rivojlantirish va kompyuter tizimlarini ishlab chiqish zaruratini belgilaydi.

Ushbu dissertatsiya tadqiqoti natijalari muayyan darajada O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2017-yil 21-apreldagi PF-5024-son “Ekologiya va atrof-muhitni muhofaza qilish sohasida davlat boshqaruvi tizimini takomillashtirish to‘g‘risida”gi, 2018-yil 19-iyuldaggi PF-5484-son “O‘zbekiston Respublikasida atom energetikasini rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi, 2019-yil 7-fevraldaggi PQ-4165-son “2019 - 2029-yillarda O‘zbekiston Respublikada atom energetikasini rivojlantirish Konsepsiyasini tasdiqlash to‘g‘risida”gi, 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son “2022 - 2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida”gi Farmonlari, O‘zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasining 2019-yil 5-sentyabrdagi 737-son “O‘zbekiston Respublikasida atrof tabiiy muhitning davlat monitoringi tizimini takomillashtirish to‘g‘risida”gi Qarori hamda ushbu sohaga oid boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga xizmat qiladi.

**Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi.** Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining IV. “Axborotlashtirish va axborot-kommunikatsiya texnologiyalarini rivojlantirish” ustuvor yo‘nalishiga muvofiq amalga oshirilgan.

**Muammoning o‘rganilganlik darajasi.** Zararli aralashmalar, jumladan radioaktiv moddalarning atmosferada tarqalish jarayonlarini matematik modellashtirish usullarini rivojlantirish masalalari S.R. Hanna, G.A. Briggs, G. Fornier, A. Robert, E. Kalnay, V.I. Kotlyarov, A.S. Monin, A.M. Obuxov, G.I. Marchuk, A.Ye. Aloyan, M.Ye. Berlyand, I.E. Naats va boshqa xorijiy tadqiqotchilarining ishlarida aks ettirilgan. O‘zbekistonda atmosferaning ekologik holatini baholash va bashoratlash masalalarini yechish uchun matematik modellar, sonli algoritmlar va dasturiy vositalarni ishlab chiqishga F.B. Abutaliyev, K.S. Karimberdiyeva, N. Ravshanov, M.L. Arushanov, B.S. Telemuratova, D.K. Sharipov va boshqa olimlar rahbarligidagi ilmiy jamoalar salmoqli hissa qo‘shgan.

Ko‘plab ilmiy nashrlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, atmosferada radioaktiv moddalarning tarqalishining mezomasshtabli jarayonlari ko‘p omilli, nochiziqli va stoxastik tabiatga ega. Bunda ular turbulent diffuziya, konvektiv va advektiv oqimlar, quruq gravitatsion cho‘kish, nam yuvilish, fotokimyoviy o‘zgarishlar, radioaktiv parchalanish va boshqalarni o‘z ichiga olgan butun bir fizik jarayonlar majmuasini qamrab oladi. Ushbu ta’sir etuvchi omillar yoki ularning birikmalari ko‘pincha mavjud modellarda to‘liq hisobga olinmaydi va tavsiflanmaydi - ayniqsa haqiqiy relyef, murakkab ob-havo sharoiti va atmosferaning fazoviy bir xil emasligi sharoitida. Ushbu ilmiy sohadagi shubhasiz taraqqiyotga qaramay, turli omillar ta’sirida mezomasshtabli sharoitlarda radioaktiv moddalarning atmosferada ko‘chishi modellarini yanada takomillashtirish yakunlangan vazifa emas, balki doimiy ravishda rivojlanib borayotgan ilmiy yo‘nalishdir. Bu yangi bilimlar, texnologiyalar va ma’lumotlarni keyingi izlanishlar orqali aniqlashni talab etadi.

**Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliv ta’lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog’liqligi.** Dissertatsiya tadqiqoti Raqamli texnologiyalar va sun’iy intellektni rivojlantirish ilmiy-tadqiqot instituti A-OT-2021-108-sonli “Orolbo’yi mintaqasi atrof-muhitining ekologik holatini kuzatish va bashorat qilishning axborot-tahliliy tizimini ishlab chiqish” (2021-2023 yillar) hamda Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti Samarqand filialining F2-FQ-0-47339F-015-sonli “Kvant o’lchamli nanostrukturalar fizikasi” (2014-2018 yillar) mavzusidagi ilmiy loyihalar doirasida bajarilgan.

**Tadqiqot maqsadi** atmosferada radioaktiv moddalar tarqalishining mezomasshtabli jarayonlarini matematik modellarini, ekologik monitoring va radiatsion xavfsizlikni nazorat qilish masalalarini yechish uchun sonli algoritmlar va dasturiy ta’minotlar majmuasini ishlab chiqishdan iborat.

**Tadqiqotning vazifalari:**

atmosferadagi murakkab modda ko‘chishi jarayonlarini sonli modellashtirish uchun mavjud modellar va usullarini tahlilini amalga oshirish;

yog‘ingarchilik yordamida yuvilish va boshqa fizik omillarni hisobga olgan holda atmosferada radioaktiv moddalar konsentratsiyasining tarqalishini tahlil qilish va bashorat qilish uchun atmosferada modda ko‘chishining matematik modelini takomillashtirish;

vaqt va fazoviy o‘zgaruvchilar bo‘yicha yuqori aniqlikka ega bo‘lgan atmosferada radioaktiv moddalar konsentratsiyasining tarqalishini baholash va bashorat qilish masalasini sonli yechishning samarali algoritmini ishlab chiqish;

vaqt o‘tishi bilan tashlanma massasining o‘zgarishiga fizik jarayonlar ta’sirini hisobga olgan holda atmosferada radioaktiv moddalarning turbulent ko‘chishi mezomasshtabli jarayonining modelini ishlab chiqish.

atmosferada radioaktiv moddalarning turbulent ko‘chishi mezomasshtabli jarayoni masalasini yechish algoritmini ishlab chiqish hamda hisoblash jarayonining yuqori approksimatsiya aniqligi va barqarorligini ta’minlash;

atmosferada radioaktiv moddalarning texnogen tashlanmalar tarqalishi jarayonini sonli modellashtirish bo‘yicha hisoblash tajribalarini o‘tkazish, shuningdek, hisoblash sohasidagi ekologik yuklamani baholash uchun dasturiy majmuani ishlab chiqish.

**Tadqiqot obyekti** sifatida fizik omillar ta’sirida mezomasshtabli sharoitlarda texnogen tashlanma bol‘gan radioaktiv moddalarning atmosferada ko‘chishi va tarqalishi jarayonlari olingan.

**Tadqiqot predmeti** atmosferada radioaktiv moddalar konsentratsiyalarining fazoviy-vaqt tarqalishini baholash va bashoratlash masalalarini yechish uchun mo‘ljallangan matematik modellar, hisoblash algoritmlari va dasturiy vositalardan iborat.

**Tadqiqot usullari.** Tadqiqot jarayonida statistik tahlil, matematik modellashtirish va hisoblash tajribasi, hisoblash matematikasi usullari qo‘llanilgan, shuningdek, dasturiy majmualarni ishlab chiqish uchun obyektga yo‘naltirilgan dasturlash texnologiyalaridan foydalanilgan.

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

meteorologik sharoitlar, yog‘ingarchilik yordamida yuvilish, cho‘kish hamda radionuklidlarning xususiyatlarini hisobga olgan holda atmosferada radioaktiv moddalarning ko‘chishi va diffuziyasi jarayonining matematik modeli takomillashtirilgan;

chiziqli algebraik tenglamalar tizimini hisoblash bosqichlarini parallellashtirish asosida vaqt va fazoviy o‘zgaruvchilarga nisbatan yuqori tartibli aniqlikka ega bo‘lgan atmosferadagi radioaktiv moddalar konsentratsiyasi maydonlarini hisoblashning samarali algoritmi ishlab chiqilgan;

meteorologik sharoitlarni, hududning xususiyatlarini, radioaktiv zarrachalarning xususiyatlarini va vaqt bo‘yicha tashlanma massasining o‘zgarishiga ta’sir qiluvchi tegishli fizik omillarni hisobga olgan holda atmosferada radioaktiv moddalarning turbulent ko‘chishi mezomasshtabli jarayonining skrining modeli ishlab chiqilgan;

modellashtirishning yuqori aniqliligi va turg‘unligini ta’minlaydigan Van Leer cheklovchisi bilan yarim oshkormas Krank-Nikolson sxemasi va ikkinchi tartibli TVD sxemasining kombinatsiyasi asosida atmosferada radioaktiv moddalarini turbulent ko‘chishining mezomasshtabli jarayoni masalasini sonli yechish algoritmi ishlab chiqilgan.

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

ishlab chiqilgan matematik apparat asosida meteoparametrlar, zarrachalarning fizik-mexanik xususiyatlari, zarrachalarning cho‘kish tezligi, o‘simlik elementlari tomonidan zarrachalarni ushlab qolish omili, shuningdek, yog‘ingarchilik (yomg‘ir, qor, tuman) yordamida zarrachalarning yuvilish omilini hisobga olgan holda atmosferadagi radioaktiv moddalar konsentratsiyasini hisoblash va vizuallashtirish uchun dasturiy majmua yaratilgan;

ishlab chiqilgan dasturiy majmua yordamida mavjud va yangi loyihalashtirilayotgan sanoat obyektlari tomonidan chiqarilayotgan ifloslantiruvchi moddalardan kelib chiqadigan ekologik yukni baholash va bashoratlash bo‘yicha hisob-kitoblar amalga oshirildi. Bu esa o‘z navbatida ekologik xavflarni kamaytirish bo‘yicha asosli va o‘z vaqtida qarorlar qabul qilishni qo‘llab-quvvatlash imkoniyatini ta’minladi.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi** atmosferada moddaning diffuzion ko‘chishi tenglamalari va masalalarning chegaraviy shartlari massa saqlanish qonunlariga qat’iy muvofiq holda shakllantirildanligi bilan asoslanadi. Sonli usullardan foydalanishda hisoblash jarayonining zaruriy approksimatsiya aniqligi va yaqinlashuvchanligi ta’milangan, sonli tajribalarning natijalari esa o‘rganilayotgan jarayonning fizik mohiyatiga zid kelmaydi.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati bir qator fizik omillar ta’sirini hisobga olgan holda radioaktiv moddalarning atmosferadagi ko‘chishi va tarqalishi mezomasshtabli jarayonlarining matematik modellarini takomillashtirish hamda parallel hisoblash texnologiyalaridan foydalangan holda samarali sonli algoritmlarni ishlab chiqishdan iborat.

Dissertatsiya tadqiqoti natijalarining amaliy ahamiyati sanitariya me’yorlarini monitoring qilish, yuzaga kelishi mumkin bo’lgan ekologik xavflarni minimallashtirish va atrof-muhitni muhofaza qilish choralarini amalga oshirish bo‘yicha asosli qarorlar qabul qilinishni qo‘llab-quvvatlash maqsadida sanoat hududlarida atmosferaning ekologik monitoringi uchun dasturiy majmua ishlab chiqish bilan izohlanadi.

**Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.** Sanoat hududlari atmosferasining ekologik holatini tahlil qilish, baholash va bashorat qilish uchun matematik modellar, sonli algoritmlar hamda ularning dasturiy ta’minotini qo‘llash asosida:

atmosferaning chegara qatlqidagi ifloslantiruvchi aralashma konsentratsiyasini hisoblash va tasvirlash uchun matematik va dasturiy ta’minot ishlab chiqilgan. Dasturiy ta’minot zararli zarrachalarning fizik-mexanik xususiyatlarini, o’simliklarning yutish qobiliyatini va joyning relyefini hisobga oladi. Mazkur dasturiy ta’minot “505-sonli MKMK” MChJ faoliyatiga joriy etildi (O’zbekiston Respublikasi Samarcand viloyati hokimligining 2024-yil 6-sentyabrdagi 07-07/732-sonli ma’lumotnomasi asosida). Joriy etish natijasida asfalt ishlab chiqarishda texnologik uskunalaridan chiqadigan zararli aralashmalarning atmosferadagi konsentratsiyasini bashorat qilish aniqligi 10-12 foizga oshirilgan;

sanoat zonalari yaqinidagi atmosferada va yer yuzasida aerozol zarrachalarining konsentratsiyasini hisoblashni avtomatlashtirish uchun matematik va dasturiy ta’minot ishlab chiqilgan. Ishlab chiqilgan dasturiy ta’minot zarrachalarning fizik-mexanik va kimyoviy xususiyatlarini, shuningdek, ob-havo sharoitlari va atrof-muhitning yutish qobiliyatini hisobga oladi. Ushbu tizim “Jomboy yashil chiroqlari” MChJ faoliyatiga joriy etildi (O’zbekiston Respublikasi Samarcand viloyati hokimligining 2024-yil 6-sentyabrdagi 07-07/732-son ma’lumotnomasi asosida). Natijada, tozalash uskunalariga o’z vaqtida texnik xizmat ko’rsatish bo‘yicha asosli qarorlar qabul qilish imkoniyati yaratilgan. Bundan tashqari, sement va qurilish aralashmalarini ishlab chiqarishda ruxsat etilgan chiqindilar me’yorlari buzilishining oldini olish orqali moliyaviy va mehnat xarajatlari 6-8% ga kamayishiga erishilgan;

atmosferada va yer yuzasi sathidagi mayda zarrachalar konsentratsiyasini hisoblash hamda vizuallashirish uchun mo’ljallangan matematik va dasturiy ta’minot, aralashmalarning fizik-mexanik xususiyatlarini, shuningdek, hududning ob-havo sharoiti va relyefini inobatga olgan holda, “Shirinkent nuri” MChJ faoliyatiga joriy etildi (O’zbekiston Respublikasi Samarcand viloyati hokimligining 2024-yil 6-sentyabrdagi 07-07/732-sonli ma’lumotnomasi). Joriy etish natijasida donni maydalash va po’stlog‘ini ajratish qurilmalarining ishlashi paytida atmosferadagi zararli moddalar konsentratsiyasini baholash aniqligi 9-11 foizga oshirilgan.

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Mazkur dissertatsiya tadqiqotining natijalari 3 ta xalqaro va 4 respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokama qilingan.

**Tadqiqot natijalarining e’lon qilinganligi.** Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha jami 26 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan, O’zbekiston Respublikasi Oliy

attestatsiya komissiyasining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 15 ta maqola, jumladan, 6 tasi xalqaro va 8 tasi respublika jurnallarida nashr etilgan hamda 4 ta EHM uchun yaratilgan dasturiy mahsulotlarni qaydlash guvohnomalari olingan.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiyaning hajmi 120 betni tashkil etgan bo‘lib, kirish, to‘rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati va ilovalardan iborat.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

**Kirish** qismida dissertatsiya mavzusining O‘zbekiston Respublikasi fani va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mos ravishda dolzarbli va zaruriyati asoslangan, maqsad va vazifalar shakllantirilgan, tadqiqotning obyekti va predmeti ko‘rsatilgan, uning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan, nazariy va amaliy ahamiyatlari ochib berilgan, tadqiqot natijalarining amaliyotga joriy etish holatlari, shuningdek, tadqiqot natijalarining chop etilganligi hamda dissertatsiya tuzilishi haqida ma’lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning “**Atmosferada radioaktiv moddalarning tarqalish jarayonlarini matematik modellashtirishning hozirgi holati**” nomli birinchi bob uch paragrafdan tashkil topgan. Birinchi paragrafda radionuklidlarning atmosferada paydo bo‘lishi va tarqalishi jarayonlarining umumiyligini xususiyatlari bayon etilgan, radioaktiv aralashmalarini chiqarishning potensial manbalari tahlil qilingan. Ikkinci paragrafda atmosferadagi radioaktiv aralashmalarining tarqalishiga oid mavjud asosiy modellar ko‘rib chiqilgan. Uchinchi paragrafda radioaktiv aralashmalarining atmosferada tarqalishini matematik modellashtirish bo‘yicha asosiy masalalar va ularni hal etish yo‘llari muhokama qilingan.

Dissertatsiya ishining “**Yog‘ingarchilik yordamida cho‘kishni e’tiborga olgan holda atmosferada radioaktiv moddalarning ko‘chishi va diffuziyasini matematik modellashtirish**” deb nomlangan ikkinchi bobi besh paragrafdan iborat bo‘lib, yog‘ingarchilik yordamida cho‘kishni e’tiborga olgan holda radioaktiv moddalarning atmosferada ko‘chishi va diffuziyalanish jarayonlarini matematik modellashtirishga bag‘ishlangan. Birinchi paragrafda yog‘ingarchilik yordamida cho‘kish, yutilish, parchalanish hamda zarrachalarning yer sathi va o‘simgiliklar tomonidan ushlanib qolinishi jarayonlarini hisobga olgan holda radionuklidlar xattiharakatini tavsiflovchi takomillashtirilgan massa-ko‘chishi matematik modeli keltirilgan. Mazkur model o‘z ichiga quyidagi gidromexanika tenglamasini:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial(hC)}{\partial x} + v \frac{\partial(hC)}{\partial y} + (w - w_g) \frac{\partial(hC)}{\partial z} + (\sigma + \alpha + \lambda + \Lambda)hC = \\ = \mu \frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \mu \frac{\partial}{\partial y} \left( h \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa h \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \delta Q, \end{aligned} \quad (1)$$

hamda boshlang‘ich va chegaraviy shartlarni oladi:

$$C|_{t=0} = C^0; \quad (2)$$

$$-\mu \frac{\partial(hC)}{\partial x} \bigg|_{x=0} = \xi h(C_E - C), \quad \mu \frac{\partial(hC)}{\partial x} \bigg|_{x=L_x} = \xi h(C_E - C), \quad (3)$$

$$-\mu \frac{\partial(hC)}{\partial y} \bigg|_{y=0} = \xi h(C_E - C), \quad \mu \frac{\partial(hC)}{\partial y} \bigg|_{y=L_y} = \xi h(C_E - C), \quad (4)$$

$$-\kappa \frac{\partial(hC)}{\partial z} \bigg|_{z=0} = (\beta hC - f_0), \quad \kappa \frac{\partial(hC)}{\partial z} \bigg|_{z=L_z} = \xi h(C_E - C). \quad (5)$$

Bu yerdə  $C$  – atmosferada radioaktiv moddalarning konsentratsiyasi ( $\text{g}/\text{m}^3$ ),  $C^0$  – boshlang‘ich konsentratsiya ( $\text{g}/\text{m}^3$ ),  $C_E$  – qarab chiqilayotgan maydon chegaralaridan kelayotgan konsentratsiya ( $\text{g}/\text{m}^3$ ),  $x, y, z$  – koordinatalar sistemasi,  $u, v, w$  – uch yo‘nalishdagi shamol tezligi ( $\text{m}/\text{s}$ ),  $w_g$  – zarracha cho‘kish tezligi ( $\text{m}/\text{s}$ ),  $\sigma$  – aralashmaning atmosferada yutilish koeffitsiyenti ( $\text{c}^{-1}$ ),  $\alpha$  – o‘simlik elementlari tomonidan zarrachalarning tutilishini tavsiflovchi koeffitsiyent,  $\lambda$  – radioaktiv parchalanish doimiysi ( $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ ,  $T_{1/2}$  – o‘rganilayotgan radionuklidning yarim parchalanish davri) ( $\text{c}^{-1}$ ),  $\mu, \kappa$  – diffuziya va turbulentlik koeffitsiyentlari mos ravishda ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $Q(x, y, z)$  – radionuklidlar manbai,  $\delta$  – Dirak funksiyasi,  $f_0$  – zarrachalarning yer sathidan atmosferaga ko‘tarilishi,  $\beta$  – zarrachaning sirt bilan o‘zaro ta’sir koeffitsiyenti,  $\xi$  – o‘lchamni kichrayritish parametri,  $L_x, L_y$  – ko‘rib chiqilayotgan maydonning uzunligi va kengligi mos ravishda ( $\text{m}$ ),  $L_z$  – ACHQ balandligi,  $\Lambda$  – yog‘ingarchilik yordamida cho‘kish koeffitsiyenti,  $h$  – o‘lchamsiz kattalik, bunda  $h=0$  – agar qatlam yer ostida bo‘lsa, aks holda  $h=1$  qatlam atmosferada bo‘lsa.

Ikkinci paragrafda yog‘ingarchilikning (yomg‘ir, qor, tuman) zararli aralashmalarni yuvib ketish jarayoniga ta’siri o‘rganiladi, bunda DERM modeli metodologiyasidan foydalanib, yog‘ingarchilik yordamida cho‘kish koeffitsiyentlarini hisoblash formulalari ishlab chiqilgan, meteorologik kuzatuvlarning tajriba ma’lumotlari tahlil qilingan hamda turli yog‘ingarchilik sharoitlarida har xil o‘lchamdagি zarrachalarning cho‘kish vaqt va davomiyligi hisoblab chiqiladi:

$$\Lambda = \Lambda_w + \Lambda_s + \Lambda_r, \quad (6)$$

bunda:  $\Lambda_w$  – zararli aralashmaning yomg‘ir yog‘ishi yordamida yuvilishiga mos keladigan cho‘kish koeffitsiyenti;  $\Lambda_s$  – zararli aralashmaning qor yog‘ishi yordamida yuvilishiga mos keladigan cho‘kish koeffitsiyenti;  $\Lambda_r$  – radionuklidlarning tumanli yoki bulutli ob-havoda yuvilishiga mos keladigan cho‘kish koeffitsiyenti

$\Lambda_w, \Lambda_s$  va  $\Lambda_r$  koeffitsiyentlar quyidagi formulalar yordamida hisoblanadi:

$$\Lambda_w(r, q) = \begin{cases} a_0 \cdot q^{0.79} & \text{если } r \leq 1,4 \text{ (мкм),} \\ (b_0 + b_1 r + b_2 r^2 + b_3 r^3) f(q), & \text{агар } 1,4 < r \leq 10 \text{ (мкм);} \\ a_1 q + a_2 q^2, & \text{агар } r \geq 10 \text{ (мкм);} \end{cases} \quad (7)$$

bu yerda  $q$  – yog‘ingarchilik yog‘ish tezligi (mm/soat),  $r$  – zararli zarrachaning xarakterli o‘lchami (mkm) va parametrlari:

$$\begin{aligned} a_0 &= 8.4 \times 10^{-5}, \quad a_1 = 2.7 \times 10^{-4}, \quad a_2 = -3.618 \times 10^{-6}, \\ b_0 &= -0.1483, \quad b_1 = 0.322, \quad b_2 = -3.006 \times 10^{-2}, \quad b_3 = 9.344 \times 10^{-4}. \\ \Lambda_s(q) &= a_0 q^b. \end{aligned} \quad (8)$$

Bu yerda:

$$a_0 = 8.0 \times 10^{-5}, \quad b = \begin{cases} 0.305, & z \leq H_r; \\ 0.79, & H_r < z < H; \end{cases}$$

$H_r$  – bulutlar balandligi,  $H$  – chegaraviy qatlam balandligi.

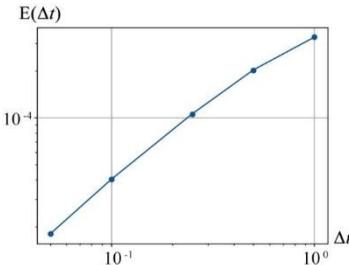
$$\Lambda_r(q) = a_0 q^{0.79}, \quad (9)$$

bunda  $a_0 = 3.36 \times 10^{-4}$ .

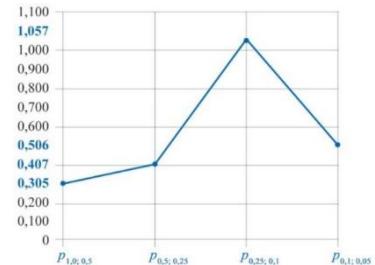
Uchinchini paragrafda atmosferadagi aralashmalar konsentratsiyasini baholash va bashoratlashning (1)-(5) masalasini yechish uchun sonli algoritm qurilishi bayon etilgan. Fazoviy o‘zgaruvchilar bo‘yicha ikkinchi tartibli aniqlikdagi approksimatsiya qo‘llanilgan, haydash usulidan foydalanib bosqichma-bosqich yechish algoritmi ishlab chiqilgan. To‘rtinchi paragrafda katta hajmdagi ma’lumotlarda konsentratsion maydonlarni samarali hisoblash imkonini beruvchi Krank-Nikolson sxemasi va qo‘shma gradiyentlar usuli asosidagi parallel hisoblash algoritmi taqdim etilgan. Parallelashtirish numba kutubxonasi yordamida amalga oshirilgan bo‘lib, bu hisoblash vaqtini sezilarli darajada qisqartirgan. Beshinchi paragrafda ishlab chiqilgan algoritmnинг unumdarligi va aniqligi baholanib, to‘r va vaqt qadamining turli parametrlaridagi hisoblash tajribalari natijalari keltirilgan. Sonli usulning vaqt bo‘yicha yaqinlashishi va barqarorligi tahlili o‘tkazilgan, bu esa uning real sharoitlarda radioaktiv moddalarning tarqalishini modellashtirish uchun yaroqli ekanligini tasdiqlagan.

Etalon yechim sifatida quyidagi boshlang‘ich parametlar bilan olingan  $\Delta t_{ref} = 0.01$  bo‘lganda, jarayon parametrlari quyidagilar:  $L = M = N = 100$  m;  $Nx = Ny = Nz = 100$ ;  $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t = 1$ ;  $u = 1.7525$ ,  $v = 1.7525$ ,  $w = 0.0$ ,  $w_g = 0.01$  m/c;  $D_x = 0.001247$ ,  $D_y = 0.001247$ ,  $D_z = 0.05247$  m<sup>2</sup>/s;  $\sigma = 0.0$  c<sup>-1</sup>;  $\beta = 0$ ;  $Q_s = 0.25$  g/m<sup>2</sup>·s;  $S = 4$  m<sup>2</sup>;  $\theta^0 = 0$  g/m<sup>3</sup>;  $T = 1$ .

Keyinchalik, yuqorida ko‘rsatilgan parametrlar bo‘yicha masalaning yechimi ketma-ket quyidagi vaqt qadamlari uchun olindi:  $\Delta t_1 = 1.0$ ,  $\Delta t_2 = 0.5$ ,  $\Delta t_3 = 0.25$ ,  $\Delta t_4 = 0.1$ ,  $\Delta t_5 = 0.05$ . Shundan so‘ng, har bir vaqt birligi uchun etalon yechim bilan solishtirib xatolik hisoblab chiqildi. Xatolikni hisoblashda  $L_2$ -norma qo‘llanildi.



**1-rasm. Turli  $\Delta t$  qiymatlari uchun yechim xatoliklari grafigi**



**2-rasm. Yaqinlashuv darajasini baholash**

1-rasmdan ko‘rinib turibdiki, xatolik vaqt qadami  $\Delta t$  kichrayishi bilan kamayadi, ya’ni sonli algoritm aniqroq bo‘ladi deb hisoblash mumkin, bu esa sxemaning yaqinlashuvchanligini ko‘rsatadi.

Vaqtinchalik yaqinlashuv tartibini baholash uchun keltirilgan  $\Delta t$  qiymatlari bo‘yicha xatoliklar  $E(\Delta t)$  dan foydalanib, Richardson usuli qo‘llaniladi. Olingan yaqinlashuv tartibi  $p$  qiymatlari har bir  $\Delta t$  juftligi uchun 2-rasmda keltirilgan.

**«Atmosferada radioaktiv moddalarning parchalanishi, yuvilishi va cho‘kishini hisobga olgan holda mezomasshtabli turbulent ko‘chishini sonli modellashtirish»** nomli uchunchi bob – atmosferada radioaktiv moddalarning mezomasshtabli turbulent ko‘chishini parchalanish, yuvilish va cho‘kish jarayonlarini inobatga olgan holda modellashtirishga bag‘ishlangan.

3.1-paragrafda mezomasshtabli turbulent radioaktiv primesalar tashilishini ifodalovchi matematik model:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial((w-w_g)C)}{\partial z} + \lambda C + \alpha C = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \delta Q. \end{aligned} \quad (10)$$

boshlang‘ich va chegaraviy shartlar bilan keltirilgan:

$$C(x, y, z) \Big|_{t=0} = 0, \quad \forall (x, y, z) \in \Omega. \quad (11)$$

$$\begin{cases} C \Big|_{x=x_0} = 0, \text{ agar } u > 0; \\ K_x \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=x_0} = 0, \text{ agar } u < 0; \end{cases} \quad \begin{cases} C \Big|_{x=x_L} = 0, \text{ agar } u < 0; \\ K_x \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=x_L} = 0, \text{ agar } u > 0; \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} C \Big|_{y=y_0} = 0, \text{ agar } v > 0; \\ K_y \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_{y=y_0} = 0, \text{ agar } v < 0; \end{cases} \quad \begin{cases} C \Big|_{y=y_W} = 0, \text{ agar } v < 0; \\ K_y \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_{y=y_W} = 0, \text{ agar } v > 0; \end{cases} \quad (13)$$

$$-K_z \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = w_g + \xi C - \eta C; \quad \begin{cases} C \Big|_{z=z_H} = 0, \text{ agar } (w-w_g) < 0; \\ K_z \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=z_H} = 0, \text{ agar } (w-w_g) > 0. \end{cases} \quad (14)$$

Bu yerda  $\Omega$  – masalaning yechilish sohasi ( $\text{m}^3$ ),  $x_L$ ,  $y_W$ ,  $z_H$  – soha o‘lchamlari ( $\text{m}$ ),  $u(x, y, z)$ ,  $v(x, y, z)$ ,  $w(x, y, z)$  – shamol komponentalari tezligi ( $\text{m/s}$ ),  $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$  – turbulent diffuziya koeffisientlari ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $\eta(x, y)$  – reemissiya koeffitsienti (yuza sathidan chiqish) ( $\text{m/s}$ ).

Cho‘kish tezligi  $w_g$  ni hisoblashda, uning mexanikasi Stoks formulasi asosida tasvirlanadi va natijani aniqlashtirish maqsadida Kanningem tuzatish koeffitsienti qo‘llaniladi:

$$w_g = \frac{2}{9} \frac{\langle r^2 \rangle g (\langle \rho_p \rangle - \rho_a)}{\mu_a} \theta_c,$$

bu yerda  $g$  – erkin tushish tezlanishi ( $9.81 \text{ m/s}^2$ );  $\langle r^2 \rangle$  – polidisperslikni hisobga olgan zarrachalar radiusining o‘rtacha kvadrati ( $\text{m}$ );  $\langle \rho_p \rangle$  – zarrachalarning o‘rtacha zichligi ( $\text{kg/m}^3$ );  $\rho_a$  – zarracha zishligi ( $\text{kg/m}^3$ );  $\mu_a$  – havoning dinamik yopishqoqligi ( $\text{Pa}\cdot\text{s} = \text{kg/m}\cdot\text{s}$ );  $\theta_c = 1 + \frac{\langle l_a \rangle}{r} (A_1 + A_2 e^{-A_3/l_a})$  – Kanningem tuzatish faktori, bunda  $\langle l_a \rangle = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  haroratda havo molekulalarining o‘rtacha erkin yurish yo‘li ( $\text{m}$ ) taxminan  $0,066 \cdot 10^{-6}$  mikrometrni tashkil etadi;  $r$  – zarracha radiusi ( $\text{m}$ );  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  – empirik konstantalar ( $A_1 = 1,257$ ,  $A_2 = 0,4$ ,  $A_3 = 1,1$ ).

3.2-paragrafda atmosferada radioaktiv primesaning mezomasshtabli turbulent tarqalishi masalasining (10)–(14) tenglamalar asosida sonli yechimi uchun algoritm keltirilgan. Avvalo, izlanayotgan o‘zgaruvchilarning uzlusiz o‘zgarish sohasi har bir fazoviy yo‘nalish va vaqt bo‘yicha diskretnashtiriladi, natijada bir xilda taqsimlangan hisoblash to‘ri shakllantiriladi:

$$\Omega = \left\{ \left( x_i = x_0 + i\Delta x, y_j = y_0 + j\Delta y, z_k = z_0 + k\Delta z, t_n = n\Delta t \right); \right. \\ \left. i = \overline{0, N_x - 1}; j = \overline{0, N_y - 1}; k = \overline{0, N_z - 1}; n = \overline{0, N_t - 1} \right\}.$$

Fazoviy koordinatalar bo‘yicha qadamlar:

$$\Delta x = \frac{x_L - x_0}{N_x}, \quad \Delta y = \frac{y_W - y_0}{N_y}, \quad \Delta z = \frac{z_H - z_0}{N_z},$$

va mos ravishda yacheykalar markazlarining koordinatalari

$$x_i = x_0 + (i + 0,5)\Delta x, \quad y_j = y_0 + (j + 0,5)\Delta y, \quad z_k = z_0 + (k + 0,5)\Delta z.$$

Umumiy vaqt qadamlari soni  $N_t = \lceil T/\Delta t \rceil$ ,  $\Delta t$  esa adaptiv tanlanadi, kontsentratsiya gradiyentlarini hisobga olgan holda, quyidagi Kurant–Fridrihs–Levi (CFL) barqarorlik sharti bajarilishi uchun. Shart maksimal advektsiya tezliklari va diffuziya koeffitsientlari asosida aniqlanadi.

Adveksiya uchun cheklov:

$$\Delta t_{\text{adv}} = \min \left( \frac{\Delta x}{\max(|u|) + \varepsilon}, \frac{\Delta y}{\max(|v|) + \varepsilon}, \frac{\Delta z}{\max(w - w_g) + \varepsilon} \right) \cdot 0,5.$$

Diffuziya uchun cheklov:

$$\Delta t_{\text{diff}} = \min \left( \frac{\Delta x^2}{\max(|K_x|) \cdot 2 + \varepsilon}, \frac{\Delta y^2}{\max(|K_y|) \cdot 2 + \varepsilon}, \frac{\Delta z^2}{\max(|K_z|) \cdot 2 + \varepsilon} \right) \cdot 0,5.$$

Yakuniy barqaror vaqt qadami:

$$\Delta t_{\text{safe}} = \min(\Delta t_{\text{adv}}, \Delta t_{\text{diff}}) \cdot \text{sf.}$$

Bu yerda  $\varepsilon = 10^{-16}$ , sf – tajriba asosida tanlanadigan xavfsizlik koeffitsienti, masalan, 0.1 yoki 0.7.

Bevosita qo‘yilgan masalaning yaqinlashgan yechimini topishda o‘zgaruvchan yo‘nalishlar usuli va Krank–Nikolsonning yarim-oshkor sxemasi qo‘llaniladi. Bunda advektiv hadlar Van Leer cheklovchi funksiyasi asosidagi TVD-sxema yordamida aniqlanadi, bu esa hisoblash barqarorligini oshirish va sonli tebranishlarni kamaytirishga xizmat qiladi.

(10)-tenglamaning vaqt bo‘yicha  $t_n$  qatlamdagi  $(i, j, k)$  tarmoq tugunidagi diskretnashtirilgan konservativ ko‘rinishi quyidagicha bo‘ladi:

$$\begin{aligned} & \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + \frac{F_{i+1/2,j,k}^n - F_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x} + \frac{F_{i,j+1/2,k}^n - F_{i,j-1/2,k}^n}{\Delta y} + \\ & + \frac{F_{i,j,k+1/2}^n - F_{i,j,k-1/2}^n}{\Delta z} + \frac{(\lambda + \alpha)}{2} (C_{i,j,k}^{n+1} + C_{i,j,k}^n) = \\ & = \frac{1}{\Delta x} (D_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - D_{i-1/2,j,k}^{n+1/2}) + \frac{1}{\Delta y} (D_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} - D_{i,j-1/2,k}^{n+1/2}) + \\ & + \frac{1}{\Delta z} (D_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} - D_{i,j,k-1/2}^{n+1/2}) + Q_{i,j,k}, \end{aligned} \quad (15)$$

bu yerda:  $F_{i\pm1/2,j,k}^n$ ,  $F_{i,j\pm1/2,k}^n$ ,  $F_{i,j,k\pm1/2}^n - t_n$  qatlamda to‘r yacheykalarining qirralari orqali o‘tuvchi advektiv sonli oqimlar;  $D_{i\pm1/2,j,k}^{n+1/2}$ ,  $D_{i,j\pm1/2,k}^{n+1/2}$ ,  $D_{i,j,k\pm1/2}^{n+1/2} - t_n$  va  $t_{n+1}$  qatamlari orasida o‘rtachalangan holda to‘r yacheykalarining qirralari orqali o‘tuvchi diffuzion oqimlar.

“Xom” advektiv oqimlarning approksimatsiyasi ikkinchi tartibli TVD-sxema yordamida amalga oshiriladi. Bunda Van Leer cheklovchi funksiyasi  $\phi(r_{i,j,k})$  joriy etiladi. Diffuzion oqimlar  $D_{i\pm1/2,j,k}^{n+1/2}$ ,  $D_{i,j\pm1/2,k}^{n+1/2}$ ,  $D_{i,j,k\pm1/2}^{n+1/2}$  diffuziya koeffitsientlarining garmonik o‘rtacha qiymatlari asosida hisoblab chiqiladi. Hisoblash uchun Krank–Nikolsonning yarim-oshkor sxemasi qo‘llaniladi. (10)-tenglama ko‘p o‘zgaruvchili murakkab sistema ko‘rinishiga keltiriladi. Har bir vaqt qadami  $[t_n, t_{n+1}]$  uchta bosqichga ajratiladi. Birinchi bosqichda  $x$  bo‘yicha yechiladi,  $y$  va  $z$

o‘zgaruvchilar esa sobit qilinadi, shunda oraliq  $C^n \rightarrow C^{n+1/2}$  yechim uchun quyidagi tenglama olinadi:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1/2} - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} = -\frac{F_{i+1/2,j,k}^n - F_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x} + \frac{D_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - D_{i-1/2,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x} - \frac{(\lambda + \alpha)}{2} (C_{i,j,k}^n + C_{i,j,k}^{n+1/2}). \quad (16)$$

bu yerda:

$$F_{x^-} = u_{i-1,j,k} \left( C_{i-1,j,k}^n + \frac{1}{2} \phi \left( \frac{C_{i-1,j,k}^n - C_{i-2,j,k}^n}{C_{i,j,k}^n - C_{i-1,j,k}^n + \varepsilon} \right) (C_{i-1,j,k}^n - C_{i-2,j,k}^n) \right), \quad u_{i-1,j,k} \geq 0;$$

$$F_{x^-} = u_{i-1,j,k} \left( C_{i,j,k}^n - \frac{1}{2} \phi \left( \frac{C_{i,j,k}^n - C_{i-1,j,k}^n}{C_{i+1,j,k}^n - C_{i,j,k}^n + \varepsilon} \right) (C_{i+1,j,k}^n - C_{i,j,k}^n) \right), \quad u_{i-1,j,k} < 0.$$

$$F_{x^+} = u_{i,j,k} \left( C_{i,j,k}^n + \frac{1}{2} \phi \left( \frac{C_{i,j,k}^n - C_{i-1,j,k}^n}{C_{i+1,j,k}^n - C_{i,j,k}^n + \varepsilon} \right) (C_{i,j,k}^n - C_{i-1,j,k}^n) \right), \quad u_{i,j,k} \geq 0;$$

$$F_{x^+} = u_{i,j,k} \left( C_{i+1,j,k}^n - \frac{1}{2} \phi \left( \frac{C_{i+1,j,k}^n - C_{i,j,k}^n}{C_{i+2,j,k}^n - C_{i+1,j,k}^n + \varepsilon} \right) (C_{i+2,j,k}^n - C_{i+1,j,k}^n) \right), \quad u_{i,j,k} < 0.$$

$$D_{i-1/2,j,k}^{n+1/2} = -\frac{2Kx_{i-1,j,k}Kx_{i,j,k}}{Kx_{i-1,j,k} + Kx_{i,j,k} + \varepsilon} \frac{C_{i,j,k}^{n+1/2} - C_{i-1,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x};$$

$$D_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} = -\frac{2Kx_{i,j,k}Kx_{i+1,j,k}}{Kx_{i,j,k} + Kx_{i+1,j,k} + \varepsilon} \frac{C_{i+1,j,k}^{n+1/2} - C_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x}.$$

Endi qulaylik uchun diffuzion oqimlarni  $D_{i\pm 1/2,j,k}^{n+1/2}$  orqali belgilab, garmonik o‘rtacha qiymatni shartli belgilanma sifatida kiritamiz:

$$K_{x^+} = \frac{2Kx_{i,j,k}Kx_{i+1,j,k}}{Kx_{i,j,k} + Kx_{i+1,j,k} + \varepsilon}; \quad K_{x^-} = \frac{2Kx_{i-1,j,k}Kx_{i,j,k}}{Kx_{i-1,j,k} + Kx_{i,j,k} + \varepsilon}.$$

Diffuzion hadni quyidagicha hisoblaymiz:

$$\frac{D_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - D_{i-1/2,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x} = \frac{K_{x^-}}{\Delta x^2} (C_{i-1,j,k}^{n+1/2} - C_{i,j,k}^{n+1/2}) + \frac{K_{x^+}}{\Delta x^2} (C_{i+1,j,k}^{n+1/2} - C_{i,j,k}^{n+1/2}).$$

Krank–Nikolson sxemasi asosida vaqt qatlamlari orasida diffuzion hadning o‘rtacha qiymatini hisobga olib, tenglamani qayta ifodalaymiz

$$\begin{aligned} & \left( 1 + \frac{\Delta t}{2} \frac{K_{x^-} + K_{x^+}}{\Delta x^2} + \frac{\Delta t}{2} (\lambda + \alpha) \right) C_{i,j,k}^{n+1/2} - \frac{\Delta t}{2} \frac{K_{x^-}}{\Delta x^2} C_{i-1,j,k}^{n+1/2} - \frac{\Delta t}{2} \frac{K_{x^+}}{\Delta x^2} C_{i+1,j,k}^{n+1/2} = \\ & = \frac{\Delta t}{2} \frac{K_{x^-}}{\Delta x^2} C_{i-1,j,k}^n + \left( 1 - \frac{\Delta t}{2} \frac{K_{x^-} + K_{x^+}}{\Delta x^2} - \frac{\Delta t}{2} (\lambda + \alpha) \right) C_{i,j,k}^n + \\ & + \frac{\Delta t}{2} \frac{K_{x^+}}{\Delta x^2} C_{i+1,j,k}^n - \frac{\Delta t}{2} \frac{F_{i+1/2,j,k}^n - F_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x} \end{aligned}$$

va quyidagi natijada chiziqli tenglamalar sistemasini hosil qilamiz:

$$a_i C_{i-1,j,k}^{n+1/2} + b_i C_{i,j,k}^{n+1/2} + c_i C_{i+1,j,k}^{n+1/2} = d_i. \quad (17)$$

Ikkinchı oraliq bosqichda, y bo'yicha (2-bosqich) hisoblash amalga oshiriladi, bunda  $x$  va  $z$  sobit deb olinadi. Quyidagi sxema yoziladi

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+2/3} - C_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta t} = -\frac{F_{i,j+1/2,k}^n - F_{i,j-1/2,k}^n}{\Delta y} + \frac{D_{i,j+1/2,k}^{n+2/3} - D_{i,j-1/2,k}^{n+2/3}}{\Delta y} - \frac{(\lambda + \alpha)}{2} (C_{i,j,k}^{n+1/2} + C_{i,j,k}^{n+2/3}). \quad (18)$$

Noma'lum  $C_{i,j,k}^{n+2/3}$  larni chap tomonga o'tkazib, chiziqli algebraik tenglamalar sistemasini hosil qilamiz:

$$a_j C_{i,j-1,k}^{n+2/3} + b_j C_{i,j,k}^{n+2/3} + c_j C_{i,j+1,k}^{n+2/3} = d_j. \quad (19)$$

Uchinchi bosqichda (10)-tenglama soddalashtirilgan ko'rinishda  $z$  bo'yicha yechiladi. Bu bosqichda manba hadlari  $Q$ , yutilish  $\xi$  va reemissiya  $\eta$  hisobga olinadi:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+2/3}}{\Delta t} = -\frac{F_{i,j,k+1/2}^n - F_{i,j,k-1/2}^n}{\Delta z} + \frac{D_{i,j,k+1/2}^{n+1} - D_{i,j,k-1/2}^{n+1}}{\Delta z} - \frac{(\lambda + \alpha)}{2} (C_{i,j,k}^{n+2/3} + C_{i,j,k}^{n+1}) + Q_{i,j,k}. \quad (20)$$

Avvalgi bosqichlardagi kabi, qo'yilgan qiymatlar va o'zgartirishlardan so'ng chiziqli algebraik tenglamalar sistemasi hosil qilinadi.

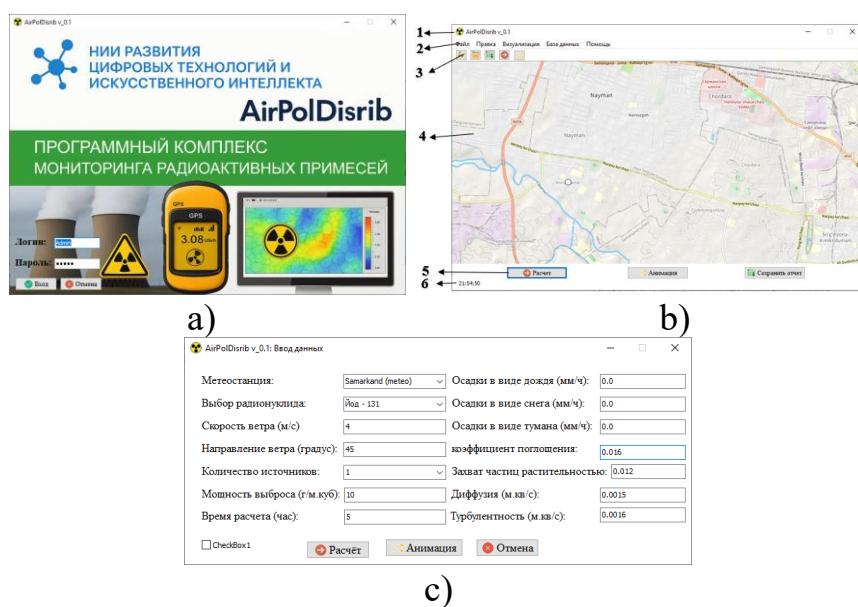
Lekin,  $k \geq 1$  da:

$$a_k C_{i,j,k-1}^{n+1} + b_k C_{i,j,k}^{n+1} + c_k C_{i,j,k+1}^{n+1} = d_k, \quad (21)$$

$k = 0$  da esa yutilish  $\xi_{z,i,j}$  va riemissiya  $\eta_{w,i,j}$  inobatga olinadi:

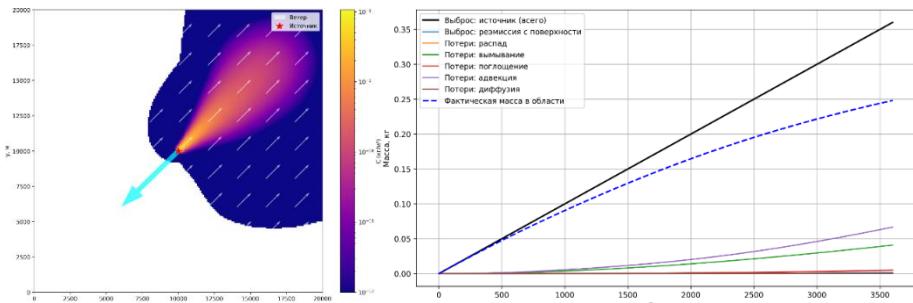
$$b_0 C_{i,j,0}^{n+1} + c_0 C_{i,j,1}^{n+1} = d_0. \quad (22)$$

Dissertatsiyaning **"Atmosferada radioaktiv moddalarning tarqalish jarayonini o'rghanish uchun dasturiy majmuani ishlab chiqish"** nomli to'rtinchi bobi atmosferada radioaktiv moddalarning ko'chish jarayonlarini modellashtirish, kuzatish va tahlil qilishga mo'ljallangan "AirPolDisrib" dasturiy majmuasini yaratishga bag'ishlangan. Zamonaviy dasturiy mahsulotlar ko'rib chiqilib, ularning qiyosiy tahlili o'tkazilgan va yangi, yanada ko'p vazifali vositani ishlab chiqish zarurati asoslangan.

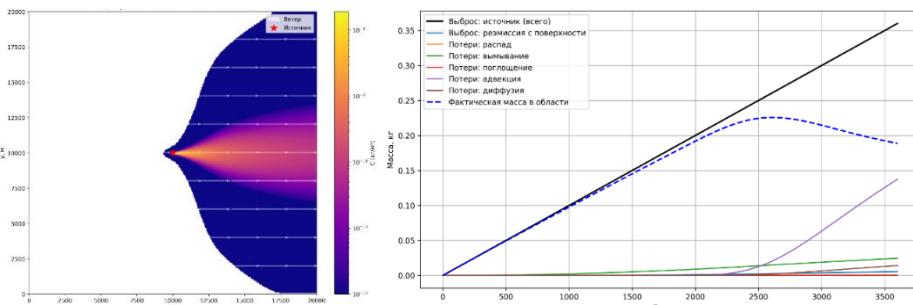


**3-rasm. Dasturiy majmua interfeysi:** a) Foydalanuvchi avtorizatsiyasi oynasi, b) dasturiy majmuuning asosiy oynasi, c) ma'lumotlarni kiritish oynasi

Foydalanuvchini tasdiqlash, ma'lumotlarni kiritish, vizuallashtirish, tahlil qilish va hisobotlarni shakllantirish uchun interfeyslar mavjud bo'lib, bu dasturiy vositani oxirgi foydalanuvchi uchun qulay va amaliy qiladi (3-rasm). Ishlab chiqilgan dasturiy majmua asosida o'tkazilgan hisoblash tajribalarining natijalari 4-5-rasmlarda ko'rsatilgan.



**4-rasm. 131-yod moddasi bo'yicha konsentratsiya taqsimoti quyidagi shartlarda:  $T = 3600$  s;  $U_{ref} = 4,0$  m/s;  $\psi = \pi/4$  rad yoki  $45^\circ$  (shamol shimoli-sharq yo'nali shida esmoqda); atmosferaning kuchsiz noaniqligi (C sinfi); yengil yomg'ir  $R = 1$  mm/soat**



**5-rasm. 131-yod moddasi bo'yicha konsentratsiya taqsimoti quyidagi shartlarda:  $T = 3600$  s;  $U_{ref} = 6,0$  m/s;  $\psi = \pi/2$  rad yoki  $90^\circ$  (shamol sharqqa qarab esmoqda); atmosferaning kuchsiz noaniqligi (C sinfi); siyrak va yengil yomg'ir  $R = 0,5$  mm/soat**

4-rasmdagi egri chiziqlar modellashtirish davomida radioaktiv primesaning chiqarilish massasining dinamikasini ko'rsatadi. Bu yerda qora uzlusiz chiziq bu  $Q \cdot T = 10^{-4} \cdot 3600 = 0,36$  kg, ya'ni bu to'liq chiqarilgan massa bo'lib, nazariy jihatdan hisoblash sohasida 1 soat ichida to'planishi mumkin bo'lgan miqdorni ifodalaydi. Ko'k punktir chiziq bu  $M = 2.4816 \cdot 10^{-1} = 0,24816$  kg – amalda hisoblash sohasida to'plangan massa, bu taxminan chiqarilgan umumiyl massasining 68,93% ini tashkil etadi, demak, 1 soat davomida primesaning katta qismi hali hududni tark etishga ulgurmagan, bu esa shamol tezligining pastligi va boshqa fizik jarayonlarning nisbatan zaif ta'siri bilan izohlanadi. Massaning fizik jarayonlar bo'yicha yo'qotilishi quyidagicha taqsimlangan: yuza sathiga yutilish 0,0049451 kg; radioaktiv parchalanish 0,00051152 kg; yuvilish (yomg'ir ta'sirida) 0,040909 kg; advektiv ko'chish 0,066727 kg; diffuziya 0,00019676 kg. Shuningdek, sirt orqali takroriy chiqish (reemissiya) 0,0014448 kg ni tashkil qiladi.

Yakuniy massaviy balansni chiqaradigan bo‘lsak, hisoblash sohasidagi massa va barcha yo‘qotishlarning (reemissiyani hisobga olgan holda) yig‘indisi quyidagicha bo‘ladi:

$$M_{\text{общ.}} = 0,24816 + 0,0049451 - 0,0014448 + 0,040909 + \\ + 0,00051152 + 0,066727 + 0,00019676 = 0,3600046 \text{ kg.}$$

Yig‘indilarning yaxlitlashdagi xatoliklarni inobatga olgan holda, natija quyidagicha  $Q \cdot T = 0,36 \text{ kg}$ . Hisoblangan farq nihoyatda kichik  $\sim 4,4409 \cdot 10^{-16} \text{ kg}$  va bu kompyuter hisoblashning mashina xatoligi bilan bog‘liq. Bu esa modellashtirishda massa saqlanish qonunining aniq bajarilganligini tasdiqlaydi.

5-rasmda chiqarilish massasining yo‘qotilish taqsimoti quyidagicha: yutilish  $2,7684 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$  (0,0008%); riemissiya:  $5,3086 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$  (1,47%) – yo‘qotishdan ayiriladi; yuvilish:  $2,4430 \cdot 10^{-2} \text{ kg}$  (6,79%); parchalanish:  $5,3186 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$  (0,15%); adveksya:  $1,3741 \cdot 10^{-1} \text{ kg}$  (38,17%); diffuziya:  $1,4159 \cdot 10^{-2} \text{ kg}$  (3,93%).

## XULOSA

Dissertatsiya ishi atmosferada radioaktiv moddalarning ko‘chishi va diffuziyasining mezomasshtabli jarayonlarini modellashtirish masalasiga bag‘ishlangan. Dissertatsiya ishi doirasida quyidagi asosiy natijalar olindi:

1. Radionuklidlarning kelib chiqishi va atmosferada tarqalish yo‘llari tahlil qilindi, radioaktiv ifloslanishning asosiy tabiiy va texnogen manbalari, jumladan AES chiqindilari, yoqilg‘i-energetika kompleksi korxonalarini va yadro qurolini sinash ko‘rib chiqildi.

2. Radioaktiv aralashmalar tarqalishini matematik modellashtirish uchun zamonaviy yondashuvlar, xususan Eyler va Lagranj modellari, shuningdek jarayonlarni fazoviy miqyoslar bo‘yicha tasniflash o‘rganildi. Bu radionuklidlar tarqalishiga meteorologik omillar va relyef xususiyatlarining ta’sirini hisobga olish imkonini beradi.

3. Matematik modellar va sonli usullarining hozirgi holati tahlil qilindi, radiatsiyaviy vaziyatni baholash masalalarida hisoblash modellarini qo‘llash, shu jumladan iqlim sharoitlari, joy relyefi va cho‘kish jarayonlarining atmosferadagi radionuklidlar xatti-harakatiga ta’siri ko‘rib chiqildi.

4. Yomg‘ir, qor, tuman ta’sirini, shuningdek radioaktiv parchalanish, turbulent diffuziya parametrlari va yer yuzasi sirt bilan o‘zaro ta’sirni hisobga olgan holda atmosferada radioaktiv moddalarning ko‘chishi va diffuziyasining matematik modeli ishlab chiqildi.

5. Haqiqiy meteoma’lumotlar asosida o‘tkazilgan hisoblash tajribalari yog‘ingarchilik turi va intensivligi, shuningdek zarrachalar o‘lchamining atmosferada radioaktiv aralashmalarining cho‘kish xarakteri va masofasiga sezilarli ta’sir ko‘rsatishi aniqlandi.

6. Ikkinchchi tartibli chekli ayirmali sxema yordamida radioaktiv aralashmalarining atmosferada ko‘chishi masalasini yechishning samarali sonli

algoritmi ishlab chiqildi va amalga oshirildi. Bu hisoblashlarning yuqori aniqliligi va barqarorligini ta'minlash imkonini berdi.

7. Krank-Nikolson chekli ayirmali sxemasi asosida parallel sonli algoritm ishlab chiqildi. Uni amalga oshirish modellashtirish samaradorligini sezilarli darajada oshirish, hisoblashlarning masshtablanishini ta'minlash va hisoblash aniqligini baholash uchun vaqt bo'yicha yaqinlashish tahlilini o'tkazish imkonini berdi.

8. Asosiy fizik jarayonlar: radioaktiv parchalanish, yog'ingarchilik yordamida yuvilish, gravitatsion cho'kish, yutilish va qayta chiqarilishini hisobga olgan holda atmosferada radioaktiv moddalarning mezomasshtabli turbulent ko'chishining matematik modeli ishlab chiqildi va asoslandi. Model parametrlari, jumladan cho'kish tezligi (Kanningem tuzatishini hisobga olgan holda) va turbulent diffuziya ko'effitsiyentlari uchun aniq ifodalar keltirildi.

9. Advektiv hadlarni TVD-aproksimatsiyalash bilan o'zgaruvchan yo'nalishlar usuli va yarim oshkormas Krank-Nikolson sxemasiga asoslangan uch o'lchovli masalani yechishning sonli algoritmi taklif etildi. Sxemaning sonli turg'unligi va yuqori aniqliligi ta'minlandi, bu esa hisoblash sohasida massa balansining saqlanishi bilan tasdiqlandi.

10. Tuzkon ko'li mintaqasining real ob-havo sharoitlarini hisobga olgan holda <sup>131</sup>I radionuklidi chiqindilarining tarqalishini modellashtirish bo'yicha hisoblash tajribalari o'tkazildi. Olingan natijalar ifoslangan shleyfning realistik shakllanishini, aralashmalarni yo'qotishini har bir fizik mexanizmining asosli ta'sirini va massaning saqlanish mezoni bo'yicha modelning yuqori ishonchlilagini ko'rsatdi.

11. Atmosferada radioaktiv aralashmalarning tarqalishini monitoring qilish va bashoratlash uchun mo'ljallangan zamonaviy dasturiy tizimlar batafsil ko'rib chiqildi. Bunday majmualarning funksionalligiga qo'yiladigan asosiy talablar aniqlandi: yuqori modellashtirish tezligi, hisob-kitoblarning aniqligi, turli xil chiqindi manbalari va ob-havo sharoitlarini qo'llab-quvvatlash, vizualizatsiya va qulay foydalanuvchi interfeysi.

12. Radiatsion vaziyatni modellashtirish va tahlil qilish uchun mo'ljallangan "AirPolDisrib" dasturiy majmuasi ishlab chiqildi va amalga oshirildi. Dastur dastlabki ma'lumotlarni kiritish, konsentratsiya maydonlarini hisoblash, natijalarni vizuallashtirish, hisobotlarni shakllantirish va ma'lumotlar bazasini yuritish bo'yicha funksional modullarni o'z ichiga oladi. Dasturiy majmua arxitekturasi obyektga yo'naltirilgan yondashuvni hisobga oladi, ko'p oqimli qo'llab-quvvatlash va PostgreSQL MBBT bilan integratsiya amalga oshirildi.

13. Dasturiy majmuuning ishlash qobiliyati va adekvatligini tasdiqlovchi bir qator hisoblash tajribalari o'tkazildi. Olingan modellashtirish natijalari turli ob-havo sharoitlari, shamol yo'nalishi va sirt xususiyatlarini hisobga olgan holda radioaktiv aralashmalar tarqalishining realistik dinamikasini ko'rsatdi. Kompleks massa balansi mezoni bo'yicha yuqori aniqlikni namoyish etdi va radiatsiyaviy monitoringning tezkor va rejali vazifalarida foydalanish uchun yaroqli ekanligi aniqlandi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.13.30.12.2021.Т.142.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫЕ СТЕПЕНИ ПРИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ  
ИНСТИТУТЕ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И  
ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

---

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ РАЗВИТИЯ  
ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

**УБАЙДУЛЛАЕВ МАЛИК ШАВКАТОВИЧ**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ПРОЦЕССОВ  
АТМОСФЕРНОГО ПЕРЕНОСА И ДИФФУЗИИ РАДИОАКТИВНЫХ  
ПРИМЕСЕЙ**

05.01.07 – Математическое моделирование. Численные методы и комплексы программ

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

**Ташкент - 2025**

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан под номером B2024.3.PhD/T4871.

Диссертация выполнена в Научно-исследовательском институте развития цифровых технологий и искусственного интеллекта.

Автореферат диссертации размещён на трёх языках (узбекский, русский, английский (резюме)) на сайте Научного совета ([www.airi.uz](http://www.airi.uz)) и на Информационно-образовательном портале «Ziyonet» ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Научный руководитель:**

**Ахмедов Дильшот Дильмурадович**  
доктор философии по техническим наукам, с.н.с.

**Официальные оппоненты:**

**Эшматов Бахтиёр Хасанович**  
доктор физико-математических наук, доцент

**Шафиев Турсун Рустамович**  
доктор философии по техническим наукам, доцент

**Ведущая организация:**

**Каршинский государственный университет**

Защита диссертации состоится « 03 » октября 2025 г. в 14:00 часов на заседании Научного совета DSc.13.30.12.2021.T.142.01 при Научно-исследовательском институте развития цифровых технологий и искусственного интеллекта. (Адрес: 100125, г. Ташкент, Мирзо Улугбекский р-н, Буз-2, 17А Тел.: (+99871) 263-41-98; e-mail: [info@airi.uz](mailto:info@airi.uz))

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Научно-исследовательского института развития цифровых технологий и искусственного интеллекта (регистрационный номер № 61). (Адрес: 100125, г. Ташкент, Мирзо Улугбекский р-н, Буз-2, 17А Тел.: (+99871) 263-41-98; e-mail: [info@airi.uz](mailto:info@airi.uz))

Автореферат диссертации разослан « 17 » сентября 2025 года.  
(реестр протокола рассылки № 16 от « 12 » сентября 2025 года)



**Н. Равшанов**  
Председатель Научного совета по присуждению ученых степеней,  
доктор технических наук, профессор

**Ф.М. Нуралиев**  
Ученый секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней,  
доктор технических наук, профессор



**Э.Ш. Назирова**  
Председатель Научного семинара при Научном  
совете по присуждению ученых степеней,  
доктор технических наук, профессор

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

**Актуальность и востребованность диссертации.** В мире уделяется значительное внимание вопросам математического моделирования процессов распространения техногенных выбросов радионуклидов в атмосфере. Накопленная мировая история из более чем сотни значимых инцидентов, около двадцати из которых имели серьёзные или катастрофические последствия, подчёркивает исключительную важность своевременного прогнозирования и точной оценки характера и масштаба распространения аварийных выбросов радиоактивных примесей. Интерес к данному научному направлению обусловлен как необходимостью повышения эффективности управления долгосрочными экологическими и социально-экономическими последствиями радиоактивного загрязнения, так и потребностью в оперативной оценке рисков и минимизации ущерба, прежде всего для жизни и здоровья населения. Актуальность научных исследований, направленных на усовершенствование математического и программного обеспечения для компьютерного моделирования мезомасштабных процессов переноса и диффузии радиоактивных примесей в атмосфере, особенно высока в странах с развитой ядерной энергетикой – таких как США, Франция, Великобритания, Япония, Южная Корея, Китай, Россия, Беларусь, Украина и других.

Во всём мире ведутся целевые исследования, направленные на разработку математических моделей, вычислительных алгоритмов и программных комплексов для прогнозирования, анализа и оценки распределения концентраций техногенных выбросов радиоактивных веществ в пограничном слое атмосферы при учёте сложной совокупности факторов, влияющих на процесс. Результаты этих исследований способны обеспечить качественно новый уровень понимания физических закономерностей и механизмов распространения радиоактивных загрязнений в атмосфере, что имеет важное значение для целей и задач экологического мониторинга.

В нашей стране, в свете реализации проекта по развитию национальной инфраструктуры атомной энергогенерации, возникает потребность создания современных инструментов оценки рисков и последствий потенциальных аварийных выбросов. Так, в Постановлении Президента Республики Узбекистан «Об утверждении Концепции развития атомной энергетики в Республике Узбекистан на период 2019 – 2029 годов» отмечается «Реализация мероприятий в области охраны окружающей среды и радиационной защиты в связи с развитием национальной ядерно-энергетической программы в соответствии с законодательством Республики Узбекистан», а Указом Президента Республики Узбекистан «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022 – 2026 годы» предусматривается «...наблюдение за окружающей средой, прогнозирование уровня ее загрязненности, постоянное обеспечение информацией государственного экологического контроля, осуществление мониторинга за состоянием загрязняющих источников и их воздействием на окружающую среду...». Успешное выполнение

предусмотренных задач определяет востребованность дальнейшего развития методов математического моделирования и разработки компьютерных систем, ориентированных на повышение эффективности деятельности экологических служб за счет оперативного контроля санитарных норм радиационной безопасности, прогнозирования условий экологической обстановки и своевременного предупреждения о рисках негативного воздействия на окружающую среду вследствие техногенного загрязнения.

Результаты, данного диссертационного исследования, в определенной мере служат выполнению задач, предусмотренных Указами и Постановлениями Президента Республики Узбекистан №УП-5024 от 21 апреля 2017 года «О совершенствовании системы государственного управления в сфере экологии и охраны окружающей среды», №УП-5484 от 19 июля 2018 года «О мерах по развитию атомной энергетики в Республике Узбекистан», ПП-4165 от 7 февраля 2019 года «Об утверждении Концепции развития атомной энергетики в Республике Узбекистан на период 2019 – 2029 годов», №УП-60 от 28 января 2022 года «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022 – 2026 годы», Постановлением Кабинета Министров Республики Узбекистан №737 от 5 сентября 2019 года «О совершенствовании системы мониторинга окружающей природной среды в Республике Узбекистан» и другими нормативно-правовыми документами, принятыми в данной сфере.

**Соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики.** Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан IV. «Информатизация и развитие информационно-коммуникационных технологий».

**Степень изученности проблемы.** Вопросы развития методов математического моделирования процессов атмосферного распространения вредных веществ, включая радиоактивные примеси, нашли отражение в работах таких зарубежных исследователей, как S.R. Hanna, G.A. Briggs, G. Fornier, A. Robert, E. Kalnay, В.И. Котляров, А.С. Монин, А.М. Обухов, Г.И. Марчук, А.Е. Алоян, М.Е. Берлянд, И.Э. Наац и других. В Узбекистане значительный вклад в разработку математических моделей, численных алгоритмов и программных средств для решения задач оценки и прогнозирования экологического состояния атмосферы внесли научные коллективы под руководством Ф.Б. Абуталиева, К.С. Каримбердиевой, Н. Равшанова, М.Л. Арушанова, Б.С. Телемуратовой, Д.К. Шарипова и других ученых.

Анализ многочисленных научных публикаций показывает, что мезомасштабные процессы распространения радиоактивных примесей в атмосфере являются многофакторными, нелинейными и стохастическими по своей природе. Причем, они включают в себя целый комплекс физических процессов, включая турбулентную диффузию, конвективные и адвективные потоки, сухое гравитационное осаждение, влажное вымывание, фотохимические трансформации, радиоактивный распад и т.д. Эти

воздействующие факторы или их сочетания зачастую не в полной мере учитываются и описываются в существующих моделях – особенно в условиях реального рельефа, сложной метеообстановки и пространственной неоднородности атмосферы. Несмотря на бесспорный прогресс, в данной научной области, дальнейшее усовершенствование моделей атмосферного переноса радиоактивных примесей в мезомасштабных условиях при воздействии различных факторов – это отнюдь не завершённая задача, а постоянно развивающееся научное направление, требующее выявления новых знаний, технологий и данных путем проведения дальнейших изысканий.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационное исследование выполнено в соответствии с планами научно-исследовательских работ Научно-исследовательского института развития цифровых технологий и искусственного интеллекта и Самаркандинского филиала Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий в рамках проектов: № Ф2-ФК-0-47339Ф-015 «Физика квантово-размерных наноструктур» (2014-2018), № А-ОТ-2021-108 «Разработка информационно-аналитической системы мониторинга и прогнозирования экологического состояния окружающей среды региона Приаралья» (2021-2023).

**Целью исследования** является разработка математических моделей мезомасштабных процессов распространения радиоактивных примесей в атмосфере, численных алгоритмов и программных средств для решения задач экологического мониторинга и контроля радиационной безопасности.

**Задачи исследования:**

проведение аналитического обзора существующих моделей и методов численного моделирования сложных процессов массопереноса в атмосфере;

усовершенствование математической модели массопереноса в атмосфере для анализа и прогнозирования распределения концентрации радиоактивных примесей в атмосфере с учетом влажного осаждения и других физических факторов;

разработка эффективного алгоритма численного решения задачи оценки и прогнозирования распределения концентрации радиоактивных примесей в атмосфере повышенного порядка точности по времени и пространственным переменным;

разработка модели мезомасштабного процесса турбулентного переноса радиоактивной примеси в атмосфере с учетом влияния совокупности физических процессов на изменение массы выброса по времени;

разработка алгоритма решения задачи мезомасштабного процесса турбулентного переноса радиоактивной примеси в атмосфере, обеспечивающего высокую точность аппроксимации и устойчивость вычислительного процесса.

разработка программного комплекса для проведения вычислительных экспериментов по численному моделированию процесса распространения

техногенных выбросов радиоактивной примеси в атмосфере, а также оценки экологической нагрузки в расчетной области.

**Объектом исследования** являются процессы атмосферного переноса и диффузии техногенных выбросов радиоактивных примесей в мезомасштабных условиях при воздействии совокупности физических факторов.

**Предметом исследования** являются математические модели, вычислительные алгоритмы и программные средства для решения задач оценки и прогноза пространственно-временного распределения концентраций выбросов радиоактивных примесей в атмосфере.

**Методы исследований.** В ходе исследования применялись методы статистического анализа, математического моделирования и вычислительного эксперимента, вычислительной математики, а также технологии объектно-ориентированного программирования для разработки программных комплексов.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

усовершенствована математическая модель процесса переноса и диффузии радиоактивной примеси в атмосфере с учетом метеоусловий, вымывания осадками, сухого осаждения и свойств радионуклидов;

разработан эффективный алгоритм расчета полей концентрации радиоактивной примеси в атмосфере с повышенным порядком точности по времени и пространственным переменным на основе параллелизации этапов вычисления систем линейных алгебраических уравнений;

разработана скрипинг модель мезомасштабного процесса турбулентного переноса радиоактивной примеси в атмосфере с учетом метеоусловий, характеристик местности, свойств радиоактивных частиц и связанных физических факторов, влияющих на изменение массы выброса по времени;

разработан алгоритм численного решения задачи мезомасштабного процесса турбулентного переноса радиоактивной примеси в атмосфере на основе комбинации полунеявной схемы Кранка–Николсона и TVD-схемы второго порядка с ограничителем Ван-Лира, обеспечивающий высокую точность и устойчивость моделирования.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

на основе разработанного математического аппарата создан программный комплекс для расчета и визуализации концентрации частиц радиоактивных примесей в атмосфере с учетом метеопараметров, физико-механических свойств частиц, скорости осаждения частиц, фактора захвата частиц элементами растительности, а также фактора вымывания частиц влажным осаждением (такими как дождь, снег, туманность);

с помощью разработанного программного комплекса были проведены расчеты по оценке и прогнозированию экологической нагрузки от выбросов загрязняющих веществ со стороны существующих и вновь проектируемых промышленных объектов, что в свою очередь обеспечило возможность

поддержки принятия обоснованных и своевременных решений по уменьшению экологических рисков.

**Достоверность результатов исследования** обосновывается тем, что уравнения диффузионного переноса субстанции в атмосфере и краевые условия задач сформулированы в строгом соответствии с основным законом сохранения. При использовании численных методов обеспечены необходимые точность аппроксимации и сходимость вычислительного процесса, а результаты численных экспериментов не противоречат физической природе исследуемого процесса.

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

Научная значимость результатов исследования объясняется тем, что они вносят определенный вклад в развитие методов математического моделирования мезомасштабных процессов атмосферного переноса и диффузии радиоактивных примесей при учете влияния совокупности физических факторов, а также разработки эффективных численных алгоритмов с использованием технологий параллельных вычислений.

Практическая значимость результатов диссертационного исследования объясняется применением разработанного программного комплекса для экологического мониторинга атмосферы в районах функционирования промышленных объектов с целью мониторинга санитарных норм и поддержки принятия обоснованных решений по минимизации возможных экологических рисков и проведения природоохранных мероприятий.

**Внедрение результатов исследования.** На основе применения математических моделей, численных алгоритмов и их программного обеспечения для анализа, оценки и прогнозирования экологического состояния атмосферы промышленных регионов:

математическое и программное обеспечение для расчета и визуализации концентрации загрязняющей примеси в пограничном слое атмосферы при учете физико-механических свойств вредных частиц, а также поглощающей способности растительности и рельефа местности, внедрены в деятельности ООО «СПМК-505» (Справка Хокимията Самаркандской области Республики Узбекистан от 6 сентября 2024 года за № 07-07/732). В результате внедрения обеспечена возможность увеличения на 10-12% точности прогнозирования концентрации вредных примесей в атмосфере, выбрасываемых технологическим оборудованием при производстве асфальта;

математическое и программное обеспечение для автоматизации расчетов концентрации аэрозольных частиц в атмосфере вблизи промышленных зон и на поверхности земли с учётом физико-механических и химических свойств частиц, а также погодных условий и поглощающей способности окружающей среды, внедрены в деятельности ООО «Жомбой яшил чироклари» (Справка Хокимията Самаркандской области Республики Узбекистан от 6 сентября 2024 года за № 07-07/732). В результате внедрения обеспечена возможность поддержки принятия обоснованных решений по своевременному техобслуживанию очистных сооружений и сокращению финансовых и

трудовых затрат на 6-8% за счёт предотвращения нарушений норм допустимых выбросов при производстве цемента и строительных примесей;

математическое и программное обеспечение для расчета и визуализации концентрации мелкодисперсных частиц в атмосфере и на поверхности земли, принимая во внимание физико-механические и химические свойства примесей, а также метеоусловия и орографию местности, внедрены в деятельности ООО «Ширикент нури» (Справка Хокимията Самаркандской области Республики Узбекистан от 6 сентября 2024 года за № 07-07/732). В результате внедрения была увеличена на 9-11% точность оценки концентрации вредных веществ в атмосфере при работе зернодробильных и шелушильных установок.

**Апробация результатов исследования.** Результаты данного исследования были обсуждены на 3 международных и 4 республиканских научных конференциях.

**Публикация результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано 26 научных работ, из которых 15 статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций, в том числе 6 в зарубежных (4 из которых индексированы в базе Scopus) и 9 в республиканских журналах, а также получены 4 свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ.

**Объём и структура диссертации.** Диссертация содержит 120 страниц и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики. Приведен обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации и обсуждена степень изученности проблемы, сформулированы цели и задачи, выявлены объект и предмет исследования, изложены научная новизна и практические результаты исследования, раскрыта теоретическая и практическая значимость полученных результатов, даны сведения о внедрении результатов исследования, об опубликованных работах и о структуре диссертации.

Первая глава диссертации «Современное состояние математического моделирования процессов распространения радиоактивных примесей в атмосфере» состоит из трех параграфов. В первом параграфе представлены общие характеристики процессов происхождения и распространения радионуклидов в атмосфере проведен анализ потенциальных источников выброса радиоактивных примесей. Во втором параграфе проведен обзор основных существующих моделей атмосферного распространения радиоактивных примесей в атмосфере. В третьем параграфе рассмотрены

ключевые вопросы математического моделирования атмосферного распространения радиоактивных примесей и пути их решения.

Вторая глава диссертационной работы «**Математическое моделирование атмосферного переноса и диффузии радиоактивных примесей с учетом влажного осаждения**» состоит из пяти параграфов и посвящена математическому моделированию процессов атмосферного переноса и диффузии радиоактивных примесей с учетом влажного осаждения. В первом параграфе представлена усовершенствованная математическая модель массопереноса, описывающая поведение радионуклида с учетом процессов влажного осаждения, поглощения, распада и захвата частиц подстилающей поверхностью и растительностью. Данная модель включает в себя уравнение гидромеханики:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial(hC)}{\partial x} + v \frac{\partial(hC)}{\partial y} + (w - w_g) \frac{\partial(hC)}{\partial z} + (\sigma + \alpha + \lambda + \Lambda)hC = \\ = \mu \frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \mu \frac{\partial}{\partial y} \left( h \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa h \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \delta Q, \end{aligned} \quad (1)$$

с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$C|_{t=0} = C^0; \quad (2)$$

$$-\mu \frac{\partial(hC)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \xi h (C_E - C), \quad \mu \frac{\partial(hC)}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = \xi h (C_E - C), \quad (3)$$

$$-\mu \frac{\partial(hC)}{\partial y} \Big|_{y=0} = \xi h (C_E - C), \quad \mu \frac{\partial(hC)}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = \xi h (C_E - C), \quad (4)$$

$$-\kappa \frac{\partial(hC)}{\partial z} \Big|_{z=0} = (\beta hC - f_0), \quad \kappa \frac{\partial(hC)}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = \xi h (C_E - C). \quad (5)$$

Здесь  $C$  – концентрация радиоактивных примесей в атмосфере ( $\text{г}/\text{м}^3$ ),  $C^0$  – начальная концентрация ( $\text{г}/\text{м}^3$ ),  $C_E$  – концентрация, поступающая через границы рассматриваемой территории ( $\text{г}/\text{м}^3$ ),  $x, y, z$  – система координат,  $u, v, w$  – скорость ветра в трех направлениях ( $\text{м}/\text{с}$ ),  $w_g$  – скорость осаждения примеси ( $\text{м}/\text{с}$ ),  $\sigma$  – коэффициент атмосферного поглощения примеси ( $\text{с}^{-1}$ ),  $\alpha$  – коэффициент, характеризующий захват частиц элементами растительности,  $\lambda$  – постоянная радиоактивного распада ( $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ ,  $T_{1/2}$  – период полураспада исследуемого радионуклида) ( $\text{с}^{-1}$ ),  $\mu, \kappa$  – коэффициенты диффузии и турбулентности соответственно ( $\text{м}^2/\text{с}$ ),  $Q(x, y, z)$  – источник радионуклидов,  $\delta$  – функция Дирака,  $f_0$  – поднятие частиц в атмосферу с подстилающей поверхности земли,  $\beta$  – коэффициент взаимодействия частицы с поверхностью,  $\xi$  – параметр уменьшения размерности,  $L_x, L_y$  – длина и ширина рассматриваемой площади соответственно (м),  $L_z$  – высота

АПС,  $\Lambda$  – коэффициент влажного осаждения,  $h$  – безразмерная величина, при этом параметр, при этом параметр  $h$  может принимать значения: 0 – если слой находится под землей, 1 – если слой находится в атмосфере.

Во втором параграфе исследуется влияние атмосферных осадков (дождя, снега, тумана) на процесс вымывания вредных примесей. Используя методику модели DERM, разработаны формулы для расчета коэффициентов влажного осаждения, проанализированы экспериментальные данные метеонаблюдений и выполнены расчеты времени и времени осаждения частиц различного размера при разных осадках:

$$\Lambda = \Lambda_w + \Lambda_s + \Lambda_r, \quad (6)$$

где:  $\Lambda_w$  – коэффициент осаждения, который соответствует вымыванию загрязняющей примеси дождем;  $\Lambda_s$  – коэффициент осаждения, который соответствует вымыванию загрязняющей примеси снегом;  $\Lambda_r$  – коэффициент осаждения, который соответствует растворению радионуклидов в тумане и облачности с последующим осаждением.

Коэффициенты  $\Lambda_w$ ,  $\Lambda_s$  и  $\Lambda_r$  вычисляются, используя следующие формулы:

$$\Lambda_w(r, q) = \begin{cases} a_0 \cdot q^{0.79} & \text{если } r \leq 1,4 \text{ (мкм),} \\ (b_0 + b_1 r + b_2 r^2 + b_3 r^3) f(q) & \text{если } 1,4 < r \leq 10 \text{ (мкм),} \\ a_1 q + a_2 q^2 & \text{если } r \geq 10 \text{ (мкм),} \end{cases} \quad (7)$$

где  $q$  – скорость выпадения осадков (мм/час),  $r$  – характерный размер загрязняющей частицы (мкм) и параметры:

$$\begin{aligned} a_0 &= 8.4 \times 10^{-5}, \quad a_1 = 2.7 \times 10^{-4}, \quad a_2 = -3.618 \times 10^{-6}, \\ b_0 &= -0.1483, \quad b_1 = 0.322, \quad b_2 = -3.006 \times 10^{-2}, \quad b_3 = 9.344 \times 10^{-4}. \\ \Lambda_s(q) &= a_0 q^b. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь:

$$a_0 = 8.0 \times 10^{-5}, \quad b = \begin{cases} 0.305, & z \leq H_r, \\ 0.79, & H_r < z < H, \end{cases}$$

$H_r$  – высота облаков,  $H$  – высота пограничного слоя.

$$\Lambda_r(q) = a_0 q^{0.79}, \quad (9)$$

где  $a_0 = 3.36 \times 10^{-4}$ .

Третий параграф посвящён построению численного алгоритма решения задачи (23)-(27) оценки и прогнозирования концентраций примесей в атмосфере. Применена аппроксимация второго порядка точности по пространственным переменным, реализован пошаговый алгоритм решения с использованием метода прогонки. В четвертом параграфе разработан параллельный вычислительный алгоритм на основе схемы Кранка–Николсона и метода сопряжённых градиентов, обеспечивающий эффективный расчет

концентрационных полей при больших объемах данных. Распараллеливание реализовано с использованием библиотеки `numba`, что позволило значительно сократить время расчетов. Пятый параграф содержит оценку производительности и точности разработанного алгоритма.

Как эталонное решение было получено при  $\Delta t_{\text{ref}} = 0.01$  с исходными параметрами процесса:  $L = M = N = 100$  м;  $N_x = N_y = N_z = 100$ ;  $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t = 1$ ;  $u = 1.7525$ ,  $v = 1.7525$ ,  $w = 0.0$ ,  $w_g = 0.01$  м/с;  $D_x = 0.001247$ ,  $D_y = 0.001247$ ,  $D_z = 0.05247$  м<sup>2</sup>/с;  $\sigma = 0.0$  с<sup>-1</sup>;  $\beta = 0$ ;  $Q_S = 0.25$  г/м<sup>2</sup>·с;  $S = 4$  м<sup>2</sup>;  $\theta^0 = 0$  г/м<sup>3</sup>;  $T = 1$ . Далее, решение задачи при вышеуказанных параметрах было последовательно получено для временных шагов:  $\Delta t_1 = 1.0$ ,  $\Delta t_2 = 0.5$ ,  $\Delta t_3 = 0.25$ ,  $\Delta t_4 = 0.1$ ,  $\Delta t_5 = 0.05$ . После чего, для каждого временного шага вычислялась ошибка по сравнению с эталонным решением. Расчет ошибки выполнялся с использованием  $L_2$ -нормы.

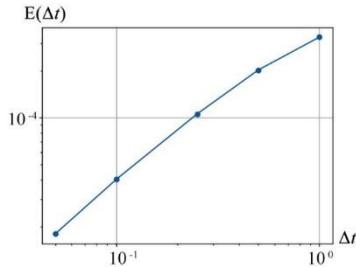


Рис. 1. График ошибок решения для различных  $\Delta t$

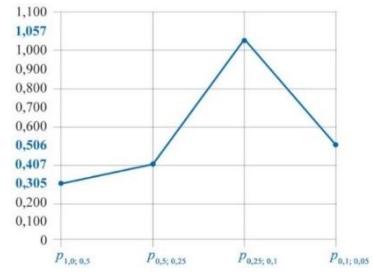


Рис. 2. Оценка порядка сходимости

Как следует из полученных результатов (рис. 1), ошибка уменьшается с уменьшением  $\Delta t$ , то есть можно считать, что численный алгоритм становится более точным, а схема сходима. Для оценки порядка временной сходимости для приведённых значений  $\Delta t$  и ошибок  $E(\Delta t)$ , используем метод Ричардсона. Полученные оценки порядка сходимости  $p$  для каждой пары  $\Delta t$  приведены на рис. 2.

Третья глава «Численное моделирование мезомасштабного турбулентного переноса радиоактивной примеси в атмосфере с учетом распада, вымывания и осаждения» посвящена моделированию мезомасштабного турбулентного распространения радиоактивных примесей в атмосфере с учетом распада, вымывания и осаждения.

В параграфе 3.1 приведен математическая модель мезомасштабного турбулентного переноса радиоактивных примесей:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial((w - w_g)C)}{\partial z} + \lambda C + \alpha C = \\
 = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \delta Q. \tag{10}
 \end{aligned}$$

с начальными и, граничными условиями

$$C(x, y, z)|_{t=0} = 0, \quad \forall (x, y, z) \in \Omega. \quad (11)$$

$$\begin{cases} C|_{x=x_0} = 0 \text{ при } u > 0; \\ K_x \frac{\partial C}{\partial x}|_{x=x_0} = 0 \text{ при } u < 0; \end{cases} \begin{cases} C|_{x=x_L} = 0 \text{ при } u < 0; \\ K_x \frac{\partial C}{\partial x}|_{x=x_L} = 0 \text{ при } u > 0; \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} C|_{y=y_0} = 0 \text{ при } v > 0; \\ K_y \frac{\partial C}{\partial y}|_{y=y_0} = 0 \text{ при } v < 0; \end{cases} \begin{cases} C|_{y=y_W} = 0 \text{ при } v < 0; \\ K_y \frac{\partial C}{\partial y}|_{y=y_W} = 0 \text{ при } v > 0; \end{cases} \quad (13)$$

$$-K_z \frac{\partial C}{\partial z}|_{z=z_0} = w_g + \xi C - \eta C; \begin{cases} C|_{z=z_H} = 0 \text{ при } (w - w_g) < 0; \\ K_z \frac{\partial C}{\partial z}|_{z=z_H} = 0 \text{ при } (w - w_g) > 0. \end{cases} \quad (14)$$

Здесь  $\Omega$  - область решения задачи ( $\text{м}^3$ ),  $x_L$ ,  $y_W$ ,  $z_H$  - размеры области ( $\text{м}$ ),  $u(x, y, z)$ ,  $v(x, y, z)$ ,  $w(x, y, z)$  - компоненты скорости ветра  $U$  ( $\text{м/с}$ ),  $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$  - коэффициенты турбулентной диффузии ( $\text{м}^2/\text{с}$ ),  $\eta(x, y)$  - коэффициент реэмиссии (вынос с поверхности) ( $\text{м/с}$ ).

Для расчета скорости осаждения  $w_g$  механика которого описывается формулой Стокса введется поправочный фактор Каннингема:

$$w_g = \frac{2}{9} \frac{\langle r^2 \rangle g (\langle \rho_p \rangle - \rho_a)}{\mu_a} \theta_c,$$

где  $g$  - ускорение свободного падения ( $9.81 \text{ м/с}^2$ );  $\langle r^2 \rangle$  - средний квадрат радиуса частиц, учитывающий полидисперсность ( $\text{м}$ );  $\langle \rho_p \rangle$  - средняя плотность частиц ( $\text{кг/м}^3$ );  $\rho_a$  - плотность частиц ( $\text{кг/м}^3$ );  $\mu_a$  - динамическая вязкость воздуха ( $\text{Па}\cdot\text{с} = \text{кг/м}\cdot\text{с}$ );  $\theta_c = 1 + \frac{\langle l_a \rangle}{r} (A_1 + A_2 e^{-A_3/l_a})$  - коррекционный фактор Каннингема,  $\langle l_a \rangle$  - средняя длина свободного пробега молекул воздуха ( $\text{м}$ ), составляющая порядка  $0.066 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  при температуре  $20^\circ \text{ С}$ ;  $r$  - радиус частиц ( $\text{м}$ );  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  - эмпирические константы ( $A_1 = 1.257$ ,  $A_2 = 0.4$ ,  $A_3 = 1.1$ ).

В параграфе 3.2 представлен численный алгоритм решения задачи (10)-(14) мезомасштабного переноса примеси. Область расчёта дискретизируется по пространству и времени с использованием равномерной сетки.:

$$\Omega = \left\{ (x_i = x_0 + i\Delta x, y_j = y_0 + j\Delta y, z_k = z_0 + k\Delta z, t_n = n\Delta t); \right. \\ \left. i = \overline{0, N_x - 1}; j = \overline{0, N_y - 1}; k = \overline{0, N_z - 1}; n = \overline{0, N_t - 1} \right\}.$$

Шаги по пространственным координатам:

$$\Delta x = \frac{x_L - x_0}{N_x}, \quad \Delta y = \frac{y_W - y_0}{N_y}, \quad \Delta z = \frac{z_H - z_0}{N_z},$$

а координаты центров ячеек, соответственно

$$x_i = x_0 + (i + 0,5) \Delta x, \quad y_j = y_0 + (j + 0,5) \Delta y, \quad z_k = z_0 + (k + 0,5) \Delta z.$$

Общее число шагов по времени  $N_t = \lceil T / \Delta t \rceil$ , а  $\Delta t$  является аддитивным и подбирается с учетом учет градиентов концентрации так, чтобы выполнялось условие устойчивости (Куранта–Фридрихса–Леви) по максимальным скоростям адвекции и коэффициентам диффузии.

Ограничение по адвекции:

$$\Delta t_{\text{adv}} = \min \left( \frac{\Delta x}{\max(|u|) + \varepsilon}, \frac{\Delta y}{\max(|v|) + \varepsilon}, \frac{\Delta z}{\max(w - w_g) + \varepsilon} \right) \cdot 0,5.$$

Ограничение по диффузии:

$$\Delta t_{\text{diff}} = \min \left( \frac{\Delta x^2}{\max(|K_x|) \cdot 2 + \varepsilon}, \frac{\Delta y^2}{\max(|K_y|) \cdot 2 + \varepsilon}, \frac{\Delta z^2}{\max(|K_z|) \cdot 2 + \varepsilon} \right) \cdot 0,5.$$

Итоговый безопасный шаг:

$$\Delta t_{\text{safe}} = \min(\Delta t_{\text{adv}}, \Delta t_{\text{diff}}) \cdot sf.$$

Здесь  $\varepsilon = 10^{-16}$ ,  $sf$  – коэффициент безопасности, выбираемый экспериментально, например 0,1 или 0,7.

Непосредственно для поиска приближенного решения поставленной задачи применим метод переменных направлений и полуявная схема Кранка–Николсона. Причем адвективные члены берутся с помощью TVD-схемы с функцией-ограничителем Ван Лира для повышения устойчивости и уменьшения численных осцилляций.

Дискретизация уравнения (10) на временном слое  $t_n$  в узле сетки  $(i, j, k)$  в консервативной форме имеет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + \frac{F_{i+1/2,j,k}^n - F_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x} + \frac{F_{i,j+1/2,k}^n - F_{i,j-1/2,k}^n}{\Delta y} + \\ & + \frac{F_{i,j,k+1/2}^n - F_{i,j,k-1/2}^n}{\Delta z} + \frac{(\lambda + \alpha)}{2} (C_{i,j,k}^{n+1} + C_{i,j,k}^n) = \\ & = \frac{1}{\Delta x} (D_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - D_{i-1/2,j,k}^{n+1/2}) + \frac{1}{\Delta y} (D_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} - D_{i,j-1/2,k}^{n+1/2}) + \frac{1}{\Delta z} (D_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} - D_{i,j,k-1/2}^{n+1/2}) + Q_{i,j,k}, \end{aligned} \quad (15)$$

где:  $F_{i\pm1/2,j,k}^n$ ,  $F_{i,j\pm1/2,k}^n$ ,  $F_{i,j,k\pm1/2}^n$  – адвективные численные потоки через грани ячеек сетки на слое  $t_n$ ;  $D_{i\pm1/2,j,k}^{n+1/2}$ ,  $D_{i,j\pm1/2,k}^{n+1/2}$ ,  $D_{i,j,k\pm1/2}^{n+1/2}$  – диффузионные потоки через грани ячеек сетки, усреднённые между слоями  $t_n$  и  $t_{n+1}$ .

Аппроксимация «сырых» адвективных потоков реализуется с помощью TVD-схемы второго порядка точности. Вводится функция-ограничитель Ван

Лира  $\phi(r_{i,j,k})$ . Диффузионные потоки  $D_{i\pm 1/2, j, k}^{n+1/2}$ ,  $D_{i, j\pm 1/2, k}^{n+1/2}$ ,  $D_{i, j, k\pm 1/2}^{n+1/2}$  вычисляются с использованием гармонического усреднения коэффициентов диффузии и неявной схемы Кранка-Николсона. Схема (10) приводится к сложной многомерной системе и используется метод переменных направлений после чего разбивается каждый шаг по времени  $[t_n, t_{n+1}]$  на три этапа, На первом этапе решаем уравнение по  $x$ , фиксируя  $y$  и  $z$ , получая промежуточное решение  $C^n \rightarrow C^{n+1/2}$ :

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1/2} - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} = -\frac{F_{i+1/2,j,k}^n - F_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x} + \frac{D_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - D_{i-1/2,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x} - \frac{(\lambda + \alpha)}{2} (C_{i,j,k}^n + C_{i,j,k}^{n+1/2}). \quad (16)$$

где:

$$\begin{aligned} F_{x^-} &= u_{i-1,j,k} \left( C_{i-1,j,k}^n + \frac{1}{2} \phi \left( \frac{C_{i-1,j,k}^n - C_{i-2,j,k}^n}{C_{i,j,k}^n - C_{i-1,j,k}^n + \varepsilon} \right) (C_{i-1,j,k}^n - C_{i-2,j,k}^n) \right), \quad u_{i-1,j,k} \geq 0; \\ F_{x^+} &= u_{i-1,j,k} \left( C_{i,j,k}^n - \frac{1}{2} \phi \left( \frac{C_{i,j,k}^n - C_{i-1,j,k}^n}{C_{i+1,j,k}^n - C_{i,j,k}^n + \varepsilon} \right) (C_{i+1,j,k}^n - C_{i,j,k}^n) \right), \quad u_{i-1,j,k} < 0. \\ F_{x^+} &= u_{i,j,k} \left( C_{i,j,k}^n + \frac{1}{2} \phi \left( \frac{C_{i,j,k}^n - C_{i-1,j,k}^n}{C_{i+1,j,k}^n - C_{i,j,k}^n + \varepsilon} \right) (C_{i,j,k}^n - C_{i-1,j,k}^n) \right), \quad u_{i,j,k} \geq 0; \\ F_{x^+} &= u_{i,j,k} \left( C_{i+1,j,k}^n - \frac{1}{2} \phi \left( \frac{C_{i+1,j,k}^n - C_{i,j,k}^n}{C_{i+2,j,k}^n - C_{i+1,j,k}^n + \varepsilon} \right) (C_{i+2,j,k}^n - C_{i+1,j,k}^n) \right), \quad u_{i,j,k} < 0. \\ D_{i-1/2,j,k}^{n+1/2} &= -\frac{2Kx_{i-1,j,k}Kx_{i,j,k}}{Kx_{i-1,j,k} + Kx_{i,j,k} + \varepsilon} \frac{C_{i,j,k}^{n+1/2} - C_{i-1,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x}; \\ D_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} &= -\frac{2Kx_{i,j,k}Kx_{i+1,j,k}}{Kx_{i,j,k} + Kx_{i+1,j,k} + \varepsilon} \frac{C_{i+1,j,k}^{n+1/2} - C_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x}. \end{aligned}$$

Теперь, для удобства обозначим гармоническое усреднение, подставив диффузионные потоки  $D_{i\pm 1/2, j, k}^{n+1/2}$ .

$$K_{x^+} = \frac{2Kx_{i,j,k}Kx_{i+1,j,k}}{Kx_{i,j,k} + Kx_{i+1,j,k} + \varepsilon}; \quad K_{x^-} = \frac{2Kx_{i-1,j,k}Kx_{i,j,k}}{Kx_{i-1,j,k} + Kx_{i,j,k} + \varepsilon}.$$

Вычислим диффузионный член

$$\frac{D_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} - D_{i-1/2,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x} = \frac{K_{x^-}}{\Delta x^2} (C_{i-1,j,k}^{n+1/2} - C_{i,j,k}^{n+1/2}) + \frac{K_{x^+}}{\Delta x^2} (C_{i+1,j,k}^{n+1/2} - C_{i,j,k}^{n+1/2}).$$

Перепишем с учетом усреднения диффузионного члена между слоями по Кранку-Николсону

$$\begin{aligned} &\left( 1 + \frac{\Delta t}{2} \frac{K_{x^-} + K_{x^+}}{\Delta x^2} + \frac{\Delta t}{2} (\lambda + \alpha) \right) C_{i,j,k}^{n+1/2} - \frac{\Delta t}{2} \frac{K_{x^-}}{\Delta x^2} C_{i-1,j,k}^{n+1/2} - \frac{\Delta t}{2} \frac{K_{x^+}}{\Delta x^2} C_{i+1,j,k}^{n+1/2} = \\ &= \frac{\Delta t}{2} \frac{K_{x^-}}{\Delta x^2} C_{i-1,j,k}^n + \left( 1 - \frac{\Delta t}{2} \frac{K_{x^-} + K_{x^+}}{\Delta x^2} - \frac{\Delta t}{2} (\lambda + \alpha) \right) C_{i,j,k}^n + \frac{\Delta t}{2} \frac{K_{x^+}}{\Delta x^2} C_{i+1,j,k}^n - \frac{\Delta t}{2} \frac{F_{i+1/2,j,k}^n - F_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x} \end{aligned}$$

и получим систему линейных уравнений:

$$a_i C_{i-1,j,k}^{n+1/2} + b_i C_{i,j,k}^{n+1/2} + c_i C_{i+1,j,k}^{n+1/2} = d_i. \quad (17)$$

На втором промежуточном шаге по  $y$  (этап 2), фиксируя  $x$  и  $z$ , запишем схему

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+2/3} - C_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta t} = -\frac{F_{i,j+1/2,k}^n - F_{i,j-1/2,k}^n}{\Delta y} + \frac{D_{i,j+1/2,k}^{n+2/3} - D_{i,j-1/2,k}^{n+2/3}}{\Delta y} - \frac{(\lambda + \alpha)}{2} (C_{i,j,k}^{n+1/2} + C_{i,j,k}^{n+2/3}). \quad (18)$$

Перенося неизвестные  $C_{i,j,k}^{n+2/3}$  в левую часть, получаем СЛАУ:

$$a_j C_{i,j-1,k}^{n+2/3} + b_j C_{i,j,k}^{n+2/3} + c_j C_{i,j+1,k}^{n+2/3} = d_j. \quad (19)$$

На третьем этапе уравнение (10) в редуцированном виде решается по  $z$ , с учетом источника  $Q$ , поглощения  $\xi$  и реэмиссии  $\eta$ :

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+2/3}}{\Delta z} = -\frac{F_{i,j,k+1/2}^n - F_{i,j,k-1/2}^n}{\Delta z} + \frac{D_{i,j,k+1/2}^{n+1} - D_{i,j,k-1/2}^{n+1}}{\Delta z} - \frac{(\lambda + \alpha)}{2} (C_{i,j,k}^{n+2/3} + C_{i,j,k}^{n+1}) + Q_{i,j,k}. \quad (20)$$

После подстановок и преобразований, как и на предыдущих этапах, получаем СЛАУ.

Причем, для  $k \geq 1$ :

$$a_k C_{i,j,k-1}^{n+1} + b_k C_{i,j,k}^{n+1} + c_k C_{i,j,k+1}^{n+1} = d_k, \quad (21)$$

а для  $k = 0$  с учетом поглощения  $\xi_{z,i,j}$  и реэмиссии  $\eta_{w,i,j}$ :

$$b_0 C_{i,j,0}^{n+1} + c_0 C_{i,j,1}^{n+1} = d_0. \quad (22)$$

Четвертая глава диссертации «Разработка программного комплекса для исследования процесса распространения радиоактивных примесей в атмосфере» посвящена реализации программного комплекса «AirPolDistrib», предназначенного для моделирования, мониторинга и анализа процессов переноса радиоактивных примесей в атмосфере. Проведён обзор современных программных продуктов, с их сравнительным анализом и обоснованием потребности в разработке нового, более функционального инструмента. Предусмотрены интерфейсы для авторизации, ввода данных, визуализации, анализа и формирования отчётности, что делает программное средство удобным и практичным для конечного пользователя (рис. 3). Результаты вычислительных экспериментов на основе разработанного программного комплекса указаны на рис. 4-5.

Кривые на рис. 4 динамику изменения массы выброса радиоактивной примеси за время моделирования. Здесь черная сплошная линия это  $Q \cdot T = 10^{-4} \cdot 3600 = 0,36$  кг, то есть вся масса выброса, теоретически способная накопиться в расчётной области за 1 час. Синяя пунктирная линия это  $M = 2.4816 \cdot 10^{-1} = 0,24816$  кг – фактически накопленная масса в области, что составляет около 68,93% от все выброшенной массы.

То есть, в течении 1 часа значительная часть примеси еще не покинула область из-за ограниченной скорости ветра и небольшого влияния остальных процессов. Распределение потерь массы по физическим процессам следующее: поглощение подстилающей поверхностью 0,0049451 кг;

радиоактивный распад 0,00051152 кг; вымывание дождём 0,040909 кг; адвективный перенос 0,066727 кг; диффузия 0,00019676 кг. При этом на повторный вынос частиц примеси с поверхности приходится 0,0014448 кг.

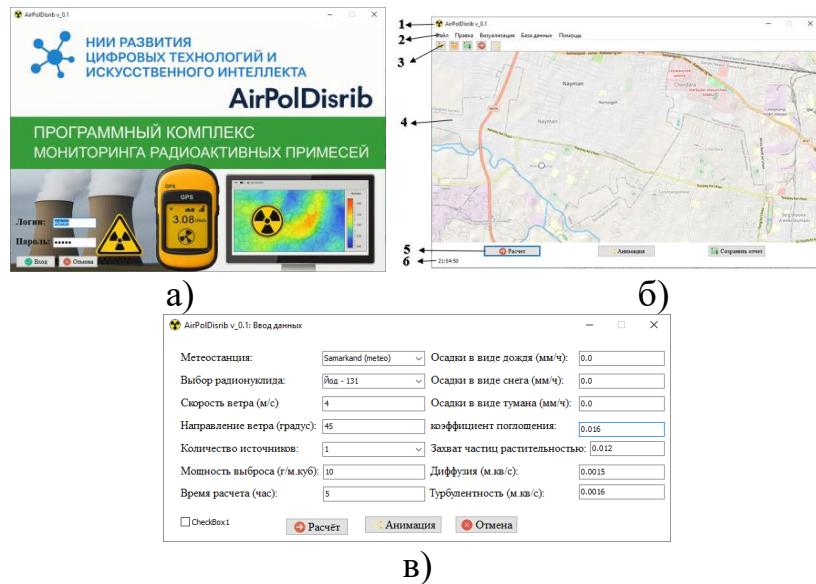


Рис. 3. Интерфейс программного комплекса: а) Окно авторизации пользователей, б) главное окно программного комплекса с открытой картой, в) диалоговое окно ввода данных

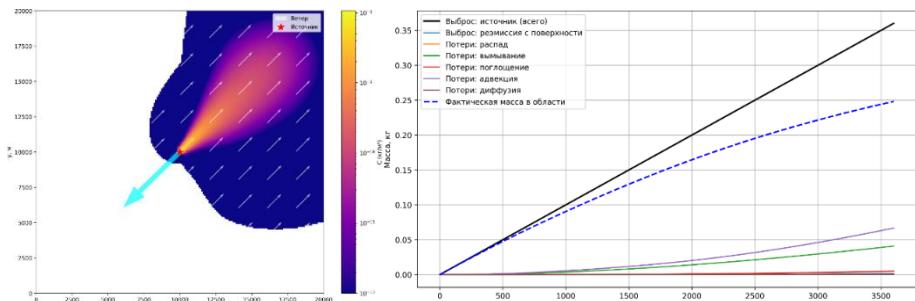


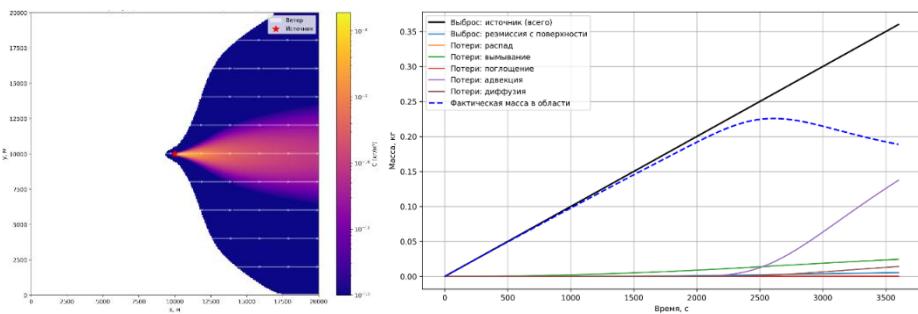
Рис. 4. Распределение концентрации выброса йода-131 при следующих условиях:  $T = 3600$  с;  $U_{\text{ref}} = 4,0$  м/с;  $\psi = \pi/4$  рад или  $45^\circ$ ; слабая неустойчивость атмосферы (класс С); легкий дождь  $R = 1$  мм/ч

Таким образом, если подвести итоговый баланс, сумма массы в расчетной области и всех потерь (с учетом ремиссии), составит

$$M_{\text{общ.}} = 0,24816 + 0,0049451 - 0,0014448 + 0,040909 + 0,00051152 + 0,066727 + 0,00019676 = 0,3600046 \text{ кг.}$$

Учитывая погрешности округления, результат близок к  $Q \cdot T = 0,36$  кг. Разница крайне мала  $\sim 4,4409 \cdot 10^{-6}$  кг и обусловлена машинной погрешностью. Это подтверждает точное соблюдение закона сохранения массы в модели.

На рис. 5 распределение потерь массы выброса следующее: поглощение  $2,7684 \cdot 10^{-6}$  кг (0,0008%); реэмиссия:  $5,3086 \cdot 10^{-3}$  кг (1,47%) – вычитается из потерь; вымывание:  $2,4430 \cdot 10^{-2}$  кг (6,79%); распад:  $5,3186 \cdot 10^{-4}$  кг (0,15%); адвекция:  $1,3741 \cdot 10^{-1}$  кг (38,17%); диффузия:  $1,4159 \cdot 10^{-2}$  кг (3,93%).



**Рис. 5. Распределение концентрации выброса йода-131 при следующих условиях:  $T = 3600$  с;  $U_{\text{ref}} = 6,0$  м/с;  $\psi = \pi/2$  рад или  $90^\circ$ ; слабая неустойчивость атмосферы (класс С); редкий легкий дождь  $R = 0,5$  мм/ч**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена моделированию мезомасштабных процессов атмосферного переноса и диффузии радиоактивных примесей. Основные результаты, полученные в рамках диссертационной работы, сводятся к следующему:

1. Проведен анализ происхождения и путей распространения радионуклидов в атмосфере, рассмотрены основные природные и техногенные источники радиоактивного загрязнения, включая выбросы АЭС, предприятия топливно-энергетического комплекса и испытания ядерного оружия.
2. Изучены современные подходы к математическому моделированию распространения радиоактивных примесей, включая эйлеровы и лагранжевы модели, а также классификация процессов по пространственным масштабам, что позволяет учитывать влияние метеофакторов и характеристик рельефа на распространение радионуклидов.
3. Проанализировано текущее состояние математических моделей и методов численного интегрирования, рассмотрены примеры применения вычислительных моделей в задачах оценки радиационной обстановки, включая влияние климатических условий, рельефа местности и процессов осаждения на поведение радионуклидов в атмосфере.
4. Разработана математическая модель атмосферного переноса и диффузии радиоактивных примесей с учётом влажного осаждения, включающая влияние дождя, снега, тумана, а также параметры радиоактивного распада, турбулентной диффузии и взаимодействия с подстилающей поверхностью.
5. Проведены вычислительные эксперименты на основе реальных метеоданных, показавшие существенное влияние типа и интенсивности осадков, а также размера частиц на характер и расстояние осаждения радиоактивных примесей в атмосфере.

6. Разработан и реализован эффективный численный алгоритм решения задачи атмосферного переноса радиоактивных примесей с помощью конечно-разностной схемы второго порядка что позволило обеспечить высокую точность и устойчивость расчетов.

7. Разработан параллельный численный алгоритм на основе конечно-разностной схемы Кранка–Николсона, реализация которого позволила существенно повысить эффективность моделирования, обеспечить масштабируемость вычислений и провести анализ временной сходимости для оценки точности расчетов.

8. Разработана и обоснована математическая модель мезомасштабного турбулентного переноса радиоактивной примеси в атмосфере с учётом ключевых физических процессов: радиоактивного распада, вымывания осадками, гравитационного осаждения, абсорбции поверхностью и реэмиссии. Приведены уточнённые выражения для параметров модели, включая скорректированную скорость оседания (с учётом поправки Каннингема) и коэффициенты турбулентной диффузии.

9. Предложен численный алгоритм решения задачи в трёхмерной постановке, основанный на методе переменных направлений и полу неявной схеме Кранка–Николсона с TVD-аппроксимацией адvectionных членов. Обеспечена численная устойчивость и высокая точность схемы, что подтверждено сохранением баланса массы в расчётной области.

10. Проведены вычислительные эксперименты по моделированию распространения выброса радионуклида  $^{131}\text{I}$  с учётом реальных метеоусловий региона озера Тузкан. Полученные результаты продемонстрировали реалистичное формирование загрязнённого шлейфа, обоснованное влияние каждого физического механизма удаления примеси и высокую достоверность модели по критерию сохранения массы.

11. Проведён детальный обзор современных программных систем, предназначенных для мониторинга и прогнозирования распространения радиоактивных примесей в атмосфере. Выявлены основные требования к функциональности таких комплексов: высокая скорость моделирования, точность расчётов, поддержка различных типов источников выбросов и метеоусловий, визуализация и удобный пользовательский интерфейс.

12. Разработан и реализован программный комплекс «AirPolDisrib», предназначенный для моделирования и анализа радиационной обстановки. Программа включает в себя функциональные модули по вводу исходных данных, расчёту полей концентрации, визуализации результатов, формированию отчетов и ведению базы данных. Архитектура комплекса учитывает объектно-ориентированный подход, реализована поддержка многопоточности и интеграция с СУБД PostgreSQL.

13. Проведён ряд вычислительных экспериментов, подтверждающих работоспособность и адекватность программного комплекса. Полученные результаты моделирования демонстрируют реалистичную динамику распространения радиоактивных примесей с учётом различных погодных условий, направления ветра и характеристик поверхности. Комплекс показал высокую точность по критерию баланса массы и пригоден для использования в оперативных и плановых задачах радиационного мониторинга.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES  
DSc.13.30.12.2021.T.142.01 AT DIGITAL TECHNOLOGIES AND  
ARTIFICIAL INTELLIGENCE DEVELOPMENT RESEARCH  
INSTITUTE**

---

**DIGITAL TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE  
DEVELOPMENT RESEARCH INSTITUTE**

**UBAYDULLAEV MALIK SHAVKATOVICH**

**MODELING OF MESOSCALE PROCESSES OF ATMOSPHERIC  
TRANSPORT AND DIFFUSION OF RADIOACTIVE IMPURITIES**

05.01.07 – Mathematical modeling. Numerical methods and software complexes

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD) ON  
TECHNICAL SCIENCES**

**Toshkent – 2025**

**The dissertation topic of the Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences is registered in the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under the number B2024.3.PhD/T4871.**

The dissertation has been prepared at the Digital Technologies and Artificial Intelligence Development Research Institute.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website [www.airi.uz](http://www.airi.uz) and website "Ziyonet" Information and educational portal ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Scintific adviser:**

**Akhmedov Dilshot Dilmuradovich**

Doctor of Philosophy of Technical Sciences,  
Senior Research

**Official opponents:**

**Eshmatov Bakhtiyor Khasanovich**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,  
Associate Professor

**Shafiev Tursun Rustamovich**

Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences,  
Associate Professor

**Leading organization:**

**Karshi State University**

The defense will take place on "03" october 2025 at 14:00 the meeting of Scientific council No. DSc.13.30.12.2021.T.142.01 at the Digital Technologies and Artificial Intelligence Development Research Institute (Address: 100125, Tashkent city, M. Ulugbek district, Buz-2, 17A. Tel.: (+99871) 263-41-98; e-mail: [info@airi.uz](mailto:info@airi.uz)).

The dissertation can be reviewed at the Information Digital Technologies and Artificial Intelligence Development Research Institute (is registered under No. 61). (Address: 100125, Tashkent city, M. Ulugbek district, Buz-2, 17A. Tel.: (+99871) 263-41-98; e-mail: [info@airi.uz](mailto:info@airi.uz)).

Abstract of dissertation sent out on "17" September 2025 y.  
(mailing report No. 16 on "12" September 2025 y.)



**N. Ravshanov**

Chairman of the scientific council awarding scientific degrees,  
Doctor of Technical Sciences, Professor

**F.M. Nuraliev**

Scientific secretary of the scientific council awarding scientific degrees,  
Doctor of Technical Sciences, Professor

**E.Sh. Nazirova**

Chairman of the academic seminar under the scientific  
council awarding scientific degrees,  
Doctor of Technical Sciences, Professor

## INTRODUCTION (Abstract of Doctoral (PhD) Dissertation)

**The aim of the research** is to develop mathematical models of mesoscale processes of propagation of radioactive impurities in the atmosphere, numerical algorithms and software for solving problems of environmental monitoring and radiation safety control.

**The object of the research** is the processes of atmospheric transport and diffusion of man-made emissions of radioactive impurities in mesoscale conditions under the influence of a combination of physical factors.

**The scientific novelty of the research** is as follows:

a mathematical model of the transport and diffusion of radioactive contaminants in the atmosphere has been improved, taking into account meteorological conditions, wet deposition (washout by precipitation), dry deposition, and the specific properties of radionuclides.

an efficient algorithm has been developed for computing the concentration fields of radioactive contaminants in the atmosphere, featuring increased accuracy in both time and spatial variables, based on the parallelization of the stages of solving systems of linear algebraic equations.

a screening model of mesoscale turbulent transport of radioactive contaminants in the atmosphere has been developed, incorporating meteorological conditions, terrain characteristics, properties of radioactive particles, and related physical factors influencing the temporal evolution of emission mass.

a numerical algorithm has been developed for solving the mesoscale turbulent transport problem of radioactive contaminants in the atmosphere, based on a combination of a semi-implicit Crank–Nicolson scheme and a second-order TVD scheme with a Van Leer flux limiter, ensuring high accuracy and numerical stability of the simulation.

**Implementation of the research results.** The results of the dissertation research, including the developed mathematical models and software for calculating and visualizing pollutant concentrations in the atmosphere – taking into account meteorological conditions, terrain orography, and the physical and chemical properties of harmful particles – have been implemented in the operations of several industrial enterprises in the Samarkand region. Specifically, the software complex was adopted at LLC “SPMK-505”, forecast accuracy during asphalt production improved by 10–12%. LLC “Jomboy Yashil Chiroqlari” reduced maintenance costs for treatment facilities by 6–8%, and LLC “Shirinkent Nuri” enhanced emission assessment from grain processing equipment by 9–11%. The effectiveness is confirmed by Certificate No. 07-07/732 issued by the Samarkand Regional Administration on September 6, 2024.

**The structure and scope of the dissertation.** The volume of the dissertation is 120 pages and consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and appendices.

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

**I бўлим (1 часть; part 1)**

1. Ravshanov N., Tashtemirova N., Alimov U., Ubaydullaev M. Modelling the Spatial Distribution of Industrial Facilities and Green Areas to Reduce the Ecological Footprint // E3S Web Conf. – 2024. – Vol. 574. – Art.N.04002. – P.1-12. (№3; Scopus, IF=0.182).
2. Ravshanov N., Tashtemirova N., Ubaydullaev M. Study of the influence of the deposition rate of dust and fine aerosol particles for monitoring and forecasting the state of the surface layer of the atmosphere in industrial regions. // International Journal of Innovative Research and Scientific Studies. – 2025. – Vol. 8, Issue 2. – Pp. 1086-1099. (№3; Scopus, IF=0.197).
3. Eshpulatov B., Ubaydullaev M. Binding Energy of a One-Dimensional Exciton in a Magnetic Field // 2020 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT). – 2020, pp. 1-3. (№3; Scopus, IF=0.1).
4. Ubaydullaev M., Eshpulatov B. Inter-Zone Light Absorption in a Size Quantized Wire // 2021 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT). – 2021. Pp. 1-5. (№3; Scopus, IF=0.1).
5. Равшанов Н.К., Таштемирова Н., Убайдуллаев М. Математическая модель для анализа динамики аэрозольных и пылевых частиц в воздушной среде // Информационные технологии моделирования и управления. – 2025. – № 1(139). – С. 29-40. (05.00.00; № 43).
6. Ахмедов Д.Д., Убайдуллаев М., Насруллаев П. Простая Лагранжева модель распространения радиоактивных частиц в атмосфере // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2024. – № 1(55). – С. 26-47. (05.00.00; № 23).
7. Равшанов Н., Ахмедов Д., Убайдуллаев М., Насруллаев П. Лагранжева модель движения дисперсной фазы в турбулентной атмосфере // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2024. – № 3(57). – С. 5-25. (05.00.00; № 23).
8. Ахмедов Д., Боборахимов Б., Убайдуллаев М., Насруллаев П. Параллельный алгоритм расчета поля приземной концентрации загрязняющей примеси в атмосфере // Международный журнал теоретических и прикладных вопросов цифровых технологий. – 2024. – Т. 7, № 3. – С. 7-20. (05.00.00; OAK Rayosatining 29.08.2023 yildagi №342/5–son qarori).
9. Ubaydullaev M. Mathematical Model of the Propagation of Radioactive Impurities in the Atmosphere and a Numerical Algorithm for Solving the Problem

using the Splitting Method // Международный журнал теоретических и прикладных вопросов цифровых технологий. – 2024. – Т. 7, № 4. – С. 92-103. (05.00.00; OAK Rayosatining 29.08.2023 yildagi №342/5-son qarori).

10. Убайдуллаев М. Моделирование процесса влажного осаждения радиоактивных примесей в атмосфере с использованием модели DERMA // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2024. – № 6(62). – С. 91-104. (05.00.00; № 23).

11. Ubaydullaev M., Muradov F. Numerical modeling of the propagation of radioactive impurities in the surface layer of the atmosphere taking into account wet deposition // Science and Innovation International Scientific Journal. – 2025. – Vol. 4, Issue 1. – Pp. 56-63. (№12; Index Copernicus).

12. Ravshanov N., Tashtemirova N., Ubaydullaev M. Direct and connected problem of transport of harmful substances in the atmosphere, taken into account of the absorption and capture of particles by vegetation in the ground layer // Bulletin of TUIT: Management and Communication Technologies. – 2024. – Vol. 2, № 14.. – С. 1-23. (05.00.00; № 31).

13. Убайдуллаев М.Ш., Мурадов Ф.А., Туркменова Р.Т. Параллельный алгоритм расчета концентрации радиоактивных примесей в атмосфере // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2025. – №2/2(66). – С. 132-143. (05.00.00; № 23).

14. Убайдуллаев М., Эшпулатов Б. Определение эффективного потенциала экситона в нанопроволоках компьютерным методом кусочно-полиномиального вычисления // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2020. – № 6(30). – С. 24-30. (05.00.00; № 23).

15. Ubaydullaev M., Eshpulatov B. Computer modeling of a calculating functions of one variable and their derivatives // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2021. – № 2(32). – С. 69-80. (05.00.00; № 23).

## II бўлим (2 часть; part 2)

16. Эшпулатов Б. Убайдуллаев М., Вычисление определенных интегралов с применением кусочно-полиномиальной схемы. // ABSTRACTS of the Uzbekistan-Malaysia international online conference Computational Models and Technologies. August 24-25. – 2020. – С. 65-67.

17. Ахмедов Д., Убайдуллаев М., Насруллаев П. Простая Лагранжева модель распространения частиц примеси в атмосфере // Информатика: проблемы, методы, технологии: сборник материалов XXIV международной научно-практической конференции им. Э.К. Алгазинова // под редакцией Д.Н.Борисова; Воронеж, Воронежский государственный университет 14-15 февраля 2024 г. – Воронеж, ВГУ. – 2024. – С. 173-183.

18. Убайдуллаев М. Математическое моделирование процессов поглощения радиоактивных примесей растительностью и их вертикальная

миграция в почвенных слоях // “Raqamli texnologiyalarning iqtisodiyot va ta’limdagi o‘rni” mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy anjumani TATU Samarqand filiali 26-27 aprel. – С. 207-210.

19. Равшанов Н., Ахмедов Д., Убайдуллаев М. Методология и методы моделирования процесса распространения вредных веществ в атмосфере // “Raqamli texnologiyalarning iqtisodiyot va ta’limdagi o‘rni” mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy anjumani TATU Samarqand filiali 26-27 aprel. – С. 221-226.

20. Akhmedov D., Ubaydullaev M., Nasrullaev P. Assessment of air pollutants distribution in the atmospheric boundary layer // Современное состояние и перспективы развития цифровых технологий и искусственного интеллекта: сборник докладов международной научно-технической конференции, г. Бухара, 27-28 сентября 2024 г.: в 2 ч. Ч. 1 / Научно-исследовательский институт развития цифровых технологий и искусственного интеллекта. – Ташкент: изд-во НИИ РЦТИИ, 2024. – С. 258-263.

21. Ubaydullaev M. Modeling of processes for the absorption of radioactive impurities by vegetation // Современное состояние и перспективы развития цифровых технологий и искусственного интеллекта: сборник докладов международной научно-технической конференции, г. Бухара, 27-28 сентября 2024 г.: в 2 ч. Ч. 1 / Научно-исследовательский институт развития цифровых технологий и искусственного интеллекта. – Ташкент: изд-во НИИ РЦТИИ, 2024. – С. 327-330.

22. Ubaydullaev M. Computer model of the propagation of radioactive emissions in the atmosphere // LII International Multidisciplinary Conference “Prospects and Key Tendencies of Science in Contemporary World”. Proceedings of the Conference (February, 2025). Bubok Publishing S.L., Madrid, Spain. – 2025. – Pp. 85-89.

23. Ubaydullaev M.Sh., Axmedov D.D., Nasrullayev P.A. Lagrangian trajectory model of radioactive particle propagation in the atmosphere “LTM-RPA 0.1” // O‘zbekiston Respublikasi adliya vazirligi Guvohnoma № DGU 42506.

24. Ubaydullaev M.Sh., Axmedov D.D., Nasrullayev P.A. Computer model of diffusion transfer of impurities in the atmosphere taking into account absorption and radioactive decay “AirPolDisrib v0.1” // O‘zbekiston Respublikasi adliya vazirligi Guvohnoma № DGU 48323.

25. Убайдуллаев М.Ш., Эшпулатов Б. Программа кусочно-полиномиального вычисления функций одной переменной, производных и интегралов // O‘zbekiston Respublikasi adliya vazirligi Guvohnoma № DGU 10027.

26. Убайдуллаев М.Ш., Эшпулатов Б. Программа кусочно-полиномиального вычисления функций двух переменных, частных производных и двойных интегралов // O‘zbekiston Respublikasi adliya vazirligi Guvohnoma № DGU 10028.