

FARG'ONA VILOYATIDA ATMOSFERA HAVOSI IFLOSLANISHINI DIFFERENSIAL TENGLAMALAR ASOSIDA KOMPYUTERLI MODELLASHTIRISH VA DASTURIY TAHLIL QILISH

No'monova O'g'iloy Salohiddin qizi

FarDU Axborot tizimlari va texnologiyalari yo'nalishi

3-kurs talabasi

ogiloynomonova875@gmail.com

A.I.Ismoilov

Farg'ona davlat universiteti

Axborot texnologiyalari kafedrası katta o'qituvchisi (PhD)

<https://doi.org/10.5281/zenodo.20622446>

Annotatsiya: Ushbu maqolada Farg'ona viloyati hududlarida atmosfera havosi ifloslanishi darajasini dinamik baholash va prognoz qilishda differensial tenglamalar hamda kompyuterli modellashtirish usullarining qo'llanilishi tahlil qilinadi. Farg'ona vodiysining o'ziga xos fizik-geografik joylashuvi, tog'lar bilan o'ralganligi va yirik sanoat korxonalari (Farg'ona neftni qayta ishlash zavodi, Quvasoy sement zavodi) hamda avtotransport oqimining ta'siri havoning ekologik holatiga sezilarli darajada ta'sir ko'rsatmoqda. Tadqiqot davomida viloyatning asosiy sanoat va aholi punktlari (Farg'ona-Marg'ilon, Qo'qon va Quvasoy zonalari) kamerali tizim (Compartmental Model) sifatida olinib, zararli zarrachalar $PM_{2.5}$ va PM_{10} tarqalishining matematik modeli oddiy differensial tenglamalar sistemasi (System of ODEs) orqali shakllantirilgan. Modelda hududlarning ichki ifloslanish manbalari, havoning tabiiy tozalanish koeffitsiyentlari va shamol oqimi orqali viloyat ichidagi havo massalarining migratsiyasi hisobga olingan. Tuzilgan matematik model Python dasturlash tilining SciPy va NumPy kutubxonalari yordamida sonli usullarda yechilgan hamda Matplotlib orqali vizuallashtirilib, dasturiy tahlil etilgan. Tadqiqot natijalari differensial tenglamalarga asoslangan kompyuterli modellashtirish hududiy ekologik monitoring tizimlarini avtomatlashtirishda va ekologik vaziyatni barqarorlashtirish bo'yicha strategik qarorlar qabul qilishda muhim dasturiy vosita ekanligini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: Atmosfera ifloslanishi, Farg'ona viloyati, Differensial tenglamalar, Kompyuterli modellashtirish, Dasturiy tahlil, $PM_{2.5}$ dinamikasi, Kamerali model (Compartment Model), Python, SciPy, Ekologik monitoring, Sanoat chiqindilari, Runge-Kutta usuli, Havo sifati indeksi (AQI), Raqamli ekologiya.

Abstract: This article analyzes the application of differential equations and computer modeling methods in the dynamic assessment and forecasting of air pollution levels across the regions of the Fergana province. The unique physical-geographic location of the Fergana Valley, surrounded by mountains, along with major industrial enterprises (Fergana Oil Refinery, Kuvasoy Cement Plant) and intensive vehicular traffic, significantly impacts the ecological state of the air. In the course of the study, the primary industrial and residential hubs of the region (Fergana-Margilan, Kokand, and Kuvasoy zones) were conceptualized as a compartmental system, and the mathematical model of particulate matter $PM_{2.5}$ and PM_{10} dispersion was formulated through a system of ordinary differential equations (System of ODEs). The model accounts for regional internal pollution sources, natural air purification coefficients, and the migration of air masses within the province driven by wind currents. The constructed mathematical model was solved numerically using the SciPy and NumPy libraries of the Python programming language, and

subsequently visualized and programmatically analyzed via Matplotlib. The research results demonstrate that computer modeling based on differential equations serves as an essential software tool for automating regional ecological monitoring systems and making strategic decisions to stabilize environmental conditions.

Keywords: Air pollution, Fergana region, Differential equations, Computer modeling, Software analysis, $PM_{2.5}$ dynamics, Compartmental model, Python, SciPy, Ecological monitoring, Industrial emissions, Runge-Kutta method, Air Quality Index (AQI), Digital ecology.

Аннотация: В данной статье анализируется применение дифференциальных уравнений и методов компьютерного моделирования для динамической оценки и прогнозирования уровня загрязнения атмосферного воздуха в регионах Ферганской области. Уникальное физико-географическое положение Ферганской долины, окруженной горами, а также влияние крупных промышленных предприятий (Ферганский нефтеперерабатывающий завод, Кувасайский цементный завод) и автотранспортных потоков оказывают существенное воздействие на экологическое состояние воздуха. В ходе исследования основные промышленные и населенные пункты области (Фергано-Маргиланская, Кокандская и Кувасайская зоны) были рассмотрены как камерная система (Compartmental Model), а математическая модель распространения вредных частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10} была сформирована посредством системы обыкновенных дифференциальных уравнений (System of ODEs). В модели учтены внутренние источники загрязнения территорий, коэффициенты естественного очищения воздуха и миграция воздушных масс внутри области под влиянием ветровых потоков. Построенная математическая модель была решена численными методами с использованием библиотек SciPy и NumPy языка программирования Python, а также визуализирована и программно проанализирована с помощью Matplotlib. Результаты исследования показывают, что компьютерное моделирование на основе дифференциальных уравнений является важным программным инструментом автоматизации систем регионального экологического мониторинга и принятия стратегических решений по стабилизации экологической ситуации.

Ключевые слова: Загрязнение атмосферы, Ферганская область, Дифференциальные уравнения, Компьютерное моделирование, Программный анализ, динамика $PM_{2.5}$ Камерная модель (Compartment Model), Python, SciPy, Экологический мониторинг, Промышленные выбросы, Метод Рунге-Кутты, Индекс качества воздуха (AQI), Цифровая экология.

Kirish: Bugungi kunda butun dunyoda sanoatlashuv jarayonlarining jadallashishi va urbanizatsiya darajasining ortishi natijasida atmosfera havosining ifloslanishi global ekologik muammolardan biriga aylandi. Ayniqsa, mayda dispersli zararli zarrachalar Bugungi kunda butun dunyoda sanoatlashuv jarayonlarining jadallashishi va urbanizatsiya darajasining ortishi natijasida atmosfera havosining ifloslanishi global ekologik muammolardan biriga aylandi. Ayniqsa, mayda dispersli zararli zarrachalar $PM_{2.5}$ va PM_{10} inson salomatligiga va atrof-muhit ekotizimiga jiddiy xavf tug'dirmoqda.[7] Jahon sog'liqni saqlash tashkiloti (JSST) va xalqaro

ekologik monitoring agentliklarining ma'lumotlariga ko'ra, havo sifati ko'rsatkichlarini doimiy nazorat qilish va kelgusi holatni prognoz qilish barqaror rivojlanishning eng muhim shartlaridan biri hisoblanadi. O'zbekiston Respublikasida ham oxirgi yillarda atmosfera havosi tozaligini saqlash, ekologik monitoring tizimlarini raqamlashtirish va sun'iy intellekt hamda matematik modellashtirish usullarini atrof-muhit muhofazasiga tatbiq etish davlat siyosatining ustuvor yo'nalishlaridan biri etib belgilangan. Ushbu nuqtai nazardan, Farg'ona viloyatining havo havzasi monitoringi o'ziga xos dolzarblikka ega. Farg'ona vodiysi fizik-geografik jihatdan tog' zanjirlari bilan o'ralgan yopiq qozonni eslatadi. Bunday geomorfologik tuzilish hududda havo massalarining tabiiy sirkulyatsiyasini qiyinlashtiradi va zararli gazlar hamda changlarning uzoq vaqt davomida bir joyda to'planib qolishiga (inversiya hodisasiga) zamin yaratadi.

Viloyatda faoliyat ko'rsatayotgan yirik sanoat majmualari, xususan, Farg'ona neftni qayta ishlash zavodi, Quvasoy sement va shisha korxonalari, kimyo sanoati ob'ektlari hamda yildan-yilga ortib borayotgan avtotransport vositalarining oqimi havoga chiqarilayotgan antropogen chiqindilar hajmini oshirmoqda. Havoning ifloslanish darajasi nafaqat ichki manbalarga, balki hududiy shamollar oqimi orqali viloyat shahar va tumanlari (Farg'ona, Marg'ilon, Qo'qon, Quvasoy) o'rtasidagi o'zaro havo massalarining migratsiyasiga ham uzviy bog'liqdir. An'anaviy ekologik stansiyalar asosan joriy holatni qayd etish bilan cheklanib, havo massalarining hududlararo dinamik ko'chishi va kelajakdagi ifloslanish tendensiyalarini oldindan yuqori aniqlikda bashorat qila olmaydi. Mazkur muammoni hal etishda dinamik jarayonlarni matematik modellashtirish, xususan, oddiy va xususiy hosilali differensial tenglamalar tizimini qo'llash eng samarali va zamonaviy yondashuv hisoblanadi. Differensial tenglamalar vaqt va makon o'zgarishi davomida moddalarning tarqalish, diffuziya, adveksiya va tabiiy yutilish (tozalanish) jarayonlarini uzluksiz funksiyalar orqali ifodalash imkonini beradi. Mazkur tadqiqot ishining maqsadi — Farg'ona viloyatining asosiy sanoat va aholi zonalarini kamerali tizim (Compartmental Model) sifatida shakllantirish, hududlararo havo ifloslanishi almashinuvining dinamik matematik modelini differensial tenglamalar tizimi orqali qurish va ushbu tizimni Python dasturlash tilining zamonaviy hisoblash kutubxonalari yordamida kompyuterli modellashtirish hamda dasturiy tahlil qilishdan iborat. Dasturiy vizuallashtirish natijalari viloyat ekologik holatini prognozlash va uni yaxshilash bo'yicha strategik boshqaruv qarorlarini qabul qilishda amaliy poydevor bo'lib xizmat qiladi.

Natija va muhokama

Matematik model va metodologiya (mathematical model and methodology)

Farg'ona viloyatida atmosfera havosining ifloslanish dinamikasini makon va vaqt bo'yicha uzluksiz baholash uchun dinamik tizimlarni modellashtirishda keng qo'llaniladigan **kamerali yondashuv (Compartmental Modeling)** usulidan foydalanildi. Bu usul tadqiqot ob'ektini o'zaro funksional bog'langan alohida quyi tizimlarga (kameralarga) ajratish va ular o'rtasidagi modda almashinuvini oddiy differensial tenglamalar sistemasi orqali ifodalash imkonini beradi.

Vaqt cheklanganligi va hisoblash resurslarini optimallashtirish maqsadida, Farg'ona viloyati geografik va sanoat joylashuviga ko'ra 3 ta asosiy yirik monitoring zonalariga (kameralarga) ajratib olindi:

1. Farg'ona-Marg'ilon sanoat va transport tuguni C_1 : Aholi zichligi yuqori bo'lgan, neftni Qayta ishlash va energetika korxonalari joylashgan markaziy hudud.

2. Qo'qon tranzit va sanoat zonasi C_2 : Yengil va oziq-ovqat sanoati rivojlangan, vodiyni boshqa hududlar bilan bog'lovchi yirik magistral yo'llarga ega g'arbiy hudud.

3.Quvasoy qurilish materiallari ishlab chiqarish zonasi C_3 : Sement, shisha va g'isht zavodlari kabi atmosferaga sement changlari va mineral zarrachalarni ko'p chiqaruvchi janubiy-sharqiy hudud.

Har bir zonadagi zararli moddalar (xususan, mayda dispersli $PM_{2.5}$ zarrachalari) konsentratsiyasining vaqt (t) bo'yicha o'zgarishi antropogen chiqindilar, havoning tabiiy tozalanishi va shamol gidrodinamikasi ta'sirida sodir bo'ladi. Ushbu omillarni inobatga olgan holda, tizimning chiziqli differensial tenglamalar sistemasi quyidagi ko'rinishda shakllantirildi:

$$\begin{cases} \frac{dC_1}{dt} = S_1 - K_1 \cdot C_1 + f_{21} \cdot C_2 - f_{13} \cdot C_1 \\ \frac{dC_2}{dt} = S_2 - K_2 \cdot C_2 + f_{12} \cdot C_1 - f_{23} \cdot C_2 \\ \frac{dC_3}{dt} = S_3 - K_3 \cdot C_3 + f_{13} \cdot C_1 + f_{23} \cdot C_2 \end{cases}$$

Model parametrlarining ilmiy asoslanishi:

$C_1(t), C_2(t), C_3(t)$ — **Holat o'zgaruvchilari**: Mos ravishda Farg'ona-Marg'ilon, Qo'qon va Quvasoy zonalaridagi (t) vaqtdagi $PM_{2.5}$ zarrachalarining joriy konsentratsiyasi $\mu g / m^3$

S_1, S_2, S_3 — **Antropogen va tabiiy emissiya manbalari** ($\mu g / (m^3 \cdot sutka)$): Hududlarning ichki ekologik yuklamasini ifodalaydi. Zavodlar, issiqlik markazlari va transport vositalaridan havoga chiqarilayotgan turg'un zarrachalar oqimi.

K_1, K_2, K_3 — **Tabiiy yutilish va tozalanish koeffitsiyentlari** ($sutka^{-1}$): Gravitatsiya kuchi ta'sirida zarrachalarning yerga o'tirishi, yashil maydonlar (daraxtlar) tomonidan yutilishi va atmosfera yog'ingarchiliklari (yomg'ir, qor) orqali havoning o'z-o'zini tozalash tezligini ko'rsatadi.

f_{ij} — **Hududlararo havo massalarining migratsiya koeffitsiyentlari** ($sutka^{-1}$): (i)-zonadan (j)-zonaga shamol oqimi (masalan, vodiyning g'arbiy va sharqiy shamollari) orqali zararli moddalarning ko'chib o'tish intensivligini belgilaydi. Tizimda massaning saqlanish qonuniga muvofiq, bir zonadan chiqqan havo oqimi ikkinchi zonaga kiruvchi manba bo'lib xizmat qiladi.

Sonli yechish metodologiyasi:

Tuzilgan tenglamalar tizimi chiziqli bo'lsada, real hayotda boshlang'ich shartlar va parametrlar tasodifiy o'zgarishi sababli, kompyuterli modellashtirishda tizimni **Runge-Kutta usulining zamonaviy 4 va 5-tartibli adaptiv varianti (RK45)** yordamida integrallash maqsadga muvofiq deb topildi. Dasturiy realizatsiya jarayoni **Python** muhitida amalga oshirildi. Differensial tenglamalarni yechish uchun `scipy.integrate.solve_ivp` funksiyasidan, [8] massivlar bilan samarali ishlash uchun `numpy` kutubxonasidan foydalanildi. Model natijalarining vizual tahlili va hududlararo solishtirma grafiklari `matplotlib.pyplot` vositasida shakllantirildi. Ushbu metodologiya vaqt davomida ifloslanish tendensiyasini aniqlash va barqarorlik nuqtalarini (*Steady State*) prognoz qilish imkonini beradi.

Tuzilgan differensial tenglamalar sistemasi va uning Python dasturlash tilidagi kompyuterli modeli asosida Farg'ona viloyatining 3 ta asosiy hududi uchun 30 kunlik dinamik prognoz ko'rsatkichlari olindi. Eksperiment davomida boshlang'ich ifloslanish darajasi (C_0) sifatida hududlarning real ekologik holatiga yaqin bo'lgan quyidagi qiymatlar kiritildi: Farg'ona-Marg'ilon zonasi uchun $45.0 \mu g / m^3$, Qo'qon zonasi uchun $35.0 \mu g / m^3$ va Quvasoy zonasi uchun $55.0 \mu g / m^3$. Dasturiy modellashtirish natijasida olingan grafik dinamikasi shuni ko'rsatadiki, barcha hududlarda zararli zarrachalar konsentratsiyasi vaqt o'tishi bilan ma'lum bir muvozanat nuqtasiga (**Steady State**) qarab intiladi.

1.Farg‘ona-Marg‘ilon zonasi C_1 : Boshlang‘ich bosqichda ichki emissiya S_1 va Qo‘qon zonasidan kirib kelayotgan havo oqimi (f_{21}) hisobiga ifloslanish darajasining dastlabki kunlarda biroz ko‘tarilishi kuzatiladi. Biroq, vaqt o‘tishi bilan tabiiy tozalanish K_1 va Quvasoy tomon havo massalarining ko‘chishi f_{13} natijasida tizim barqarorlashadi va $PM_{2.5}$ ko‘rsatkichi o‘rtacha $38-40\mu g/m^3$ atrofida muvozanatga keladi.

2.Qo‘qon zonasi C_2 Ushbu hududda transport oqimi yuqori bo‘lishiga qaramasdan, havoning tabiiy sirkulyatsiyasi va tozalanish koeffitsiyenti $K_2 = 0.25$ yuqoriroq qilib belgilangani sababli, grafikda ifloslanish darajasining sezilarli pasayishi va $25-28\mu g/m^3$ atrofida eng xavfsiz muvozanat nuqtasiga erishishi namoyon bo‘ldi.

3.Quvasoy zonasi C_3 : Modellashtirish natijalariga ko‘ra eng murakkab ekologik holat ushbu zonada kuzatildi. Quvasoyda sement sanoati chiqindilari $S_3 = 0.9$ yuqoriligi hamda Farg‘ona va Qo‘qon zonalaridan shamol yo‘nalishi bo‘yicha havo massalarining oqib kelishi ($f_{13} \cdot C_1 + f_{23} \cdot C_2$) ushbu hududda zararli zarrachalarning keskin to‘planishiga sabab bo‘ladi. Grafikda Quvasoy zonasi ko‘rsatkichining muvozanat nuqtasi $60\mu g/m^3$ dan yuqori ekanligi aniqlandi, bu esa JSST me‘yorlaridan sezilarli darajada yuqoridir.

Tahlillar shuni ko‘rsatadiki, Farg‘ona viloyatida faqatgina alohida bir shaharning o‘zida ekologik filtrlarni kuchaytirish kutilgan samarani bermasligi mumkin, chunki hududlararo differensial bog‘liqlik (shamol orqali migratsiya) zararli moddalarni qo‘shni tumanlarga ko‘chirib o‘tkazadi.

Xulosa: O‘tkazilgan tadqiqot ishi doirasida Farg‘ona viloyatining atmosfera havosi ifloslanish dinamikasi muvaffaqiyatli modellashtirildi va dasturiy tahlil etildi. Olingan natijalar asosida quyidagi xulosalarga kelindi:

1. Kamerali model (Compartmental Model) va oddiy differensial tenglamalar sistemasi yordamida hududiy havo sifati kabi murakkab va gidrometeorologik jarayonlarni yuqori aniqlikda va resurslarni tejagan holda modellashtirish mumkinligi isbotlandi.
2. Python dasturlash tilining SciPy va Matplotlib kutubxonalari yordamida yaratilgan kompyuterli model ekologik jarayonlarni shunchaki statik kuzatish emas, balki ularni vaqt davomida dinamik bashorat qilish imkonini berdi.
3. Quvasoy va Farg‘ona-Marg‘ilon sanoat zonalarida $PM_{2.5}$ zarrachalarining muvozanat nuqtasi yuqori ekanligi, ushbu hududlarda sanoat korxonalari chiqindilarini filtrlash tizimlarini zudlik bilan modernizatsiya qilish hamda yashil belbog‘larni (daraxtzorlarni) ko‘paytirish orqali tabiiy tozalanish koeffitsiyentini (K) sun‘iy oshirish zarurligini ko‘rsatadi.
4. Kelajakda ushbu loyihani hududiy ob-havo prognozlarini (API) bilan real vaqt rejimida bog‘lab, har bir tuman uchun real vaqtda ishlaydigan intellektual ekologik monitoring va ogohlantirish tizimiga (Software Dashboard) aylantirish rejalashtirilgan.

Adabiyotlar, References, Литературы:

1. Ziyayev, M. K., & Ismoilov, A. A. (2024). Farg‘ona vodiysi iqlim sharoitida atmosfera havosining antropogen ifloslanishi va uning monitoringi. *Ekologiya xabarnomasi*, 3(2), 45-52.
2. Smith, J. M., & Jones, L. R. (2022). Compartmental Modeling of Atmospheric Pollutants Using Ordinary Differential Equations. *Journal of Environmental Mathematical Modelling*, 18(4), 212-225.
3. Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., & SciPy Contributors. (2020). SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, 17(3), 261-272.
4. O‘zbekiston Respublikasi Ekologiya, atrof-muhitni muhofaza qilish va iqlim o‘zgarishi vazirligi. (2025). Atmosfera havosi monitoringi va hududiy havo sifati indeklari (AQI) bo‘yicha yillik hisobot. Toshkent.
5. Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
6. Xusanov, K. X., & Karimov, B. R. (2023). Differensial tenglamalar tizimi yordamida ekologik jarayonlarni kompyuterli modellashtirish. *Axborot texnologiyalari va tizimlari muammolari*, 2(1), 88-95.
7. World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization.
8. Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90-95.