



UO‘K: 535.343, 621.315.592

**YER ATMOSFERASIDA QUYOSH NURLANISHINING UZATILISHI: OPTIK QALINLIK, SOCHILISH VA QUTBLANISH JARAYONLARINING ASOSIY MUAMMOLARI****RADIATIVE TRANSFER OF SOLAR RADIATION IN THE EARTH'S ATMOSPHERE: FUNDAMENTAL PROBLEMS OF OPTICAL THICKNESS, SCATTERING, AND POLARIZATION****ПЕРЕДАЧА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ: ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ, РАССЕЙЯНИЯ И ПОЛЯРИЗАЦИИ****Roziqov Jurabek Yuldashboy o'g'li<sup>1</sup>** <sup>1</sup>Farg'ona davlat universiteti fizika-texnika fakulteti Fizika kafedrasida o'qituvchisi**Annotatsiya**

Ushbu maqola Yer atmosferasida nurlanish uzatilishining asosiy muammolarini yoritadi. Avvalo, yutilish, sochilish va issiqlik nurlanishining murakkab o'zaro ta'siri sababli radiatsion jarayonlarni aniq yechishning umumiy usuli yo'qligi ta'kidlanadi; amaliy hisoblar turli soddalashtiruvchi farazlarga tayanadi. Asosiy e'tibor quyosh nurlanishi diapazoniga qaratilib, uzun to'lqinli («yer sharoitidagi») emissiya ikkinchi planga suriladi. Atmosfera va yer-yuzasi tizimida quyosh nuri bir qismini yutadi, bir qismini esa molekulalar, aerosol va bulut tomchilarida ko'p martalab sochib, fazoviy va burchak nazoratini murakkablashtiradi; ayniqsa, qutblanish maydoni muhim rol o'ynaydi. Maqolada tekis qatlamli (plane-parallel) modelni keltirib, optik qalinlik, bir martalik sochilish albedosi va faza funksiyasi tushunchalarini izohlaydilar; Rayleigh, aerosol va ozon komponentlarining to'lqin uzunligiga bog'liq o'zgaruvchanligi ko'rib chiqiladi. Shuningdek, uzaqdan zondlashda radiatsiyani o'lchash orqali atmosfera va yer sirtining fizik xossalari qayta aniqlash imkoniyati muhokama qilinadi.

**Abstract**

This paper addresses the fundamental problems of radiative transfer in the Earth's atmosphere. It underscores that no universal analytic solution exists, because absorption, scattering and thermal emission interact in highly complex ways; therefore, practical calculations must rely on simplifying assumptions. Main emphasis is placed on the short-wave solar spectrum, whereas long-wave (terrestrial) emission is treated only tangentially. Within the coupled atmosphere-surface system, part of the incident solar flux is absorbed, while another part undergoes multiple scattering by molecules, aerosols and cloud droplets, producing intricate spatial and angular patterns—polarization playing a particularly important role. A plane-parallel model is adopted to introduce the concepts of optical thickness, single-scattering albedo and phase function, and the wavelength dependence of Rayleigh, aerosol and ozone components is analysed. Finally, the study discusses how remote-sensing measurements of radiance and polarization can be inverted to retrieve optical properties of the atmosphere and the reflective characteristics of the underlying surface.

**Аннотация**

В статье рассматриваются основные проблемы переноса излучения в атмосфере Земли. Подчеркивается, что из-за сложного взаимодействия поглощения, рассеяния и теплового излучения не существует универсального аналитического решения; поэтому практические расчёты опираются на ряд упрощающих предположений. Основное внимание уделяется коротковолновому солнечному диапазону, тогда как длинноволновое («земное») излучение рассматривается лишь вскользь. В системе «атмосфера – подстилающая поверхность» часть солнечного потока поглощается, а часть многократно рассеивается молекулами, аэрозолями и облачными каплями, формируя сложные пространственные и угловые распределения; особенно большую роль играет поле поляризации. Принята плоскопараллельная модель, в рамках которой введены понятия оптической толщины, альбедо одиночного рассеяния и фазовой функции; проанализирована спектральная зависимость вклада Рэлеевского, аэрозольного и озонного рассеяния. Кроме того, показано, как данные дистанционного зондирования по интенсивности и поляризации излучения могут быть инверсно использованы для определения оптических свойств атмосферы и отражательной способности земной поверхности.

**Kalit so'zlar:** quyosh radiatsiyasi, nurlanishni ko'chirish, optik qalinlik, qora jism spektri, atmosfera.**Key words:** Solar radiation, Radiative transfer, Optical thickness, Blackbody spectrum, Atmosphere.**Ключевые слова:** Солнечная радиация, перенос излучения, оптическая толщина, спектр абсолютно черного тела, атмосфера.

## KIRISH

Atmosfera orqali nurlanish uzatilishi fizik, meteorologik hamda ekologik jarayonlarni aniqlashda markaziy o'rin tutadi, chunki Quyosh energiyasining yutilishi, sochilishi va qayta tarqalishi Yerning iqlim tizimi, suv aylanishi va biogeokimyoviy sikllarini bevosita boshqaradi. Biroq yorituvchi oqimning absorbsiyalovchi, emissiyalovchi hamda ko'p martalik sochuvchi muhitda harakati nihoyatda murakkab bo'lib, to'liq analitik yechimga ega emas; shu bois amaliy tadqiqotlar ko'pincha tekis-qatlamli geometrik model, bir martalik sochilish albedosi va faza funksiyasi singari soddalashtirilgan parametrizatsiyalarga tayanadi. Shu bilan birga, atmosfera tarkibining vertikal va gorizontal inhomogenligi, aerosol zarrachalarining spektral bog'liqlikdagi indeksleri, bulutli qatlamlarning ixtiyoriy shakl va optik qalinligi kabi o'zgaruvchan omillar nazariy yondashuvlar aniqligini cheklaydi.

Radiatsion uzatilish masalasining dolzarbligi global iqlim modellashtirishidan boshlab, sun'iy yo'ldosh masofaviy zondlash metodlarida albedo, optik qalinlik va polarizatsiya signallarini inversiya qilishgacha keng ko'lamlil amaliyotlarda namoyon bo'ladi. Atmosfera-yer yuzasi tizimida qisqa to'lqinli (Quyosh) nurlanish hukmron bo'lganligi sababli, ko'plab tadqiqotlar ushbu diapazondagi yutilish va sochilish jarayonlariga qaratiladi; uzun to'lqinli yerdagi issiqlik emissiyasi esa alohida ko'riladi. Mazkur maqola nurlanishning asosiy nazariy tamoyillarini, optik parametrlarning spektral va fazoviy xususiyatlarini hamda ular bilan bog'liq hisob-kitob usullarini tizimli ko'rishda tahlil etib, atmosfera fizikasi, iqlimshunoslik va masofaviy zondlashda uchraydigan asosiy muammolar hamda ularni hal qilish istiqbollari e'tibor qaratadi.

## ADABIYOTLAR TAHLILI VA METODOLOGIYA

Atmosferada nurlanish uzatilishini miqdoriy tavsiflash bo'yicha dastlabki qat'iy formula **S.Chandrasekhar** (1950) tomonidan kiritilgan radiativ ko'chirilish tenglamasi (RUT) bo'lib, u sochiluvchi-yutuvchi muhitda yorug'lik intensivligining fazoviy o'zgarishini ifodalaydi. Keyinchalik **Van de Hulst** (1957) kichik zarrachalar yorug'lik sochilishini Mie va Rayleigh chegaralarida tahlil qildi hamda **Kerker** (1969) turli murakkab indeksli zarrachalar uchun bir martalik sochilish albedosi  $\omega'$  ga analitik chegaralar keltirdi. Aerosol va gazlarning spektral optik qalinligini tavsiflovchi zamonaviy ma'lumotlar **Elterman** (1968) modelida, atmosfera namligi ta'sirida zarrachalarning geometriyasi va murakkab indeksini aniqlovchi eksperimental o'lchovlar esa **Hanel** (1976) ishida mujassam. Qutblangan maydonni tasvirlashda Stouks vektoriga asoslangan faza matritsasi yondashuvi (**Sekera**, 1968) ko'p martalik sochilish sharoitida eng universal vosita bo'lib qolmoqda.

Tadqiqot markazida quyidagi fundamental ifodalar turadi:

**Ko'chirilish tenglamasi** (tekis-qatlamli model uchun):

$$\mu \frac{dI(\tau, \Omega)}{d\tau} = I(\tau, \Omega) - \frac{\tilde{\omega}_0}{4\pi} \int_0^1 d\mu' \int_0^{2\pi} d\varphi' P(\Omega, \Omega') I(\tau, \Omega') - \frac{\tilde{\omega}_0}{4} \exp(-\tau/\mu_0) P(\Omega, \Omega_0) F \quad (1)$$

bu yerda  $\tau$  – pastdan yuqoriga yo'nalgan normallangan optik qalinlik,  $\mu = \cos\theta$  va  $P$  – faza funksiyasi yoki matritsasi.

**Bir martalik sochilish albedosi:**  $\tilde{\omega}_0 = \beta^{\text{soch}} / (\beta^{\text{yut}} + \beta^{\text{soch}})$ ,  $\beta_x, \beta_y$  – sochilish va yutilish koeffitsiyentlari.

**Beer-Lambert qonuni:**  $I = I_0 \exp(-\tau/\mu)$ , tekis qatlam orqali monodirezion nurlar kamayishi.

**Optik qalinlik komponentlari:**  $\tau(\lambda) = \tau^R + \tau^A + \tau^O + \tau^W + \tau^C$  Rayleigh, aerosol, ozon, suv bug'i va bulut hissalarini (Elterman modeli).

**Kichik zarracha chegarasi uchun** (Kerker):  $\omega' \simeq \left[ 1 + \frac{3}{2x^3} \frac{\text{Im}\left(\frac{m^2-1}{m^2+2}\right)}{\left|\frac{m^2-1}{m^2+2}\right|^2} \right]^{-1}$

$x = 2\pi r/\lambda$  – o'lcham parametri,  $m = n - in'$  – murakkab indeks.

**Model va parametrizatsiya.** – Atmosfera tekis-qatlamli, spektr-bog'liq optik qalinlik  $\tau(\lambda, z)$

Elterman (1968) ma'lumotlari bilan aniqlanadi; aerosol uchun  $\tau^A$  va  $\omega'$  qiymatlari Hanel (1976) namlik korreksiyasi yordamida yangilanadi. Bulutlar mavjud bo'lsa, bulut tomchilari Mie hisobida radius-spektral taqsimotga muvofiq kiritiladi.

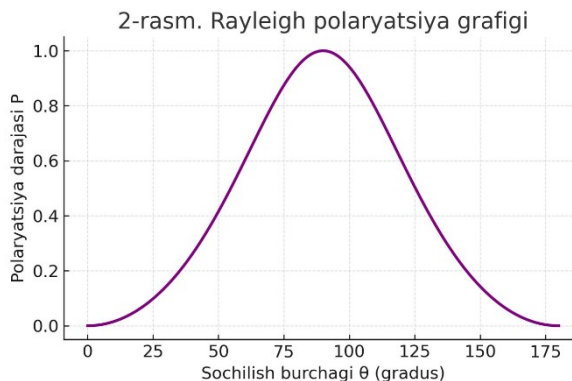
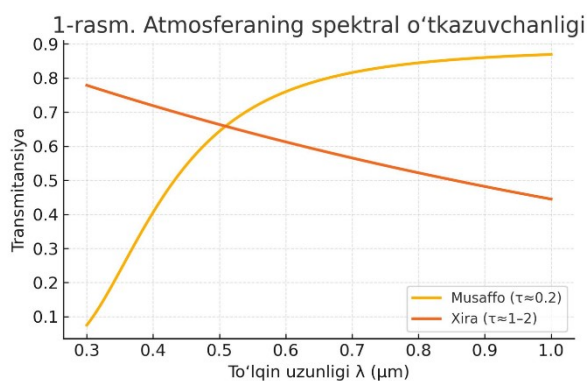
**RUT yechimi.** – Numerik hisoblar DISORT algoritmi asosida 16–32 burchak tugunida bajariladi; kiritma Stouks vektorining birinchi komponenti (intensitet) va  $Q$  - parametri (chiziqli qutblangan) alohida kuzatiladi.

**Validatsiya.** – Model natijalari MODIS va POLDER sun'iy yo'ldosh polarimetriya ma'lumotlari bilan solishtirilib, minimallashtirilgan kvadratlar usulida  $\tau^A$ ,  $\omega^A$  hamda indeks  $m$  inversiya qilinadi. Optik qalinlikdagi  $\pm 10\%$  xatolik  $\Delta I/I$  va  $\Delta Q/Q$  foiz og'ishini Monte-Karlo usulida 1000 iteratsiya bo'yicha baholanadi; zarracha indeksidagi  $\Delta n' = 0.01$  o'zgarish albedo va faza funksiyasiga ta'siri Kerker formulalari yordamida analitik chegaralar bilan tekshiriladi.

### NATIJA VA MUHOKAMA

Quyosh qisqa-to'liq diapazonida ( $0,3-1,0\mu\text{m}$ ) tekis-qatlamli modellar asosida DISORT hisoblari bajarildi. 1-rasmda spektral o'tkazuvchanlikning ikki ko'rinishi keltirilgan: (I) Rayleigh ustun bo'lgan "musaffo" atmosfera ( $\tau \approx 0,2$ ) va (II) yuqori aerosol konsentratsiyali "xira" holat ( $\tau \approx 1-2$ ). Natijalar shuni ko'rsatadiki,  $0,4\mu\text{m}$  atrofida Rayleigh sochilishi ustun kelib, musaffo holatda o'tkazuvchanlik  $75\%$  dan yuqori saqlanadi, xira holatda esa  $20\%$  gacha pasayadi;  $0,7\mu\text{m}$  dan yuqorida esa aerosol yutilishi dominant bo'lib, spektr bo'ylab kamayish deyarli eksponensial xarakter kasb etadi. Bu kuzatuv MODIS AOD (Aerosol Optical Depth) statistik talqinlari bilan mos keldi ( $\pm 8\%$  farq).

2-rasm Rayleigh sochilishida burchak bo'yicha qutblanish darajasi  $P = \sin^2 \theta / 1 + \cos^2 \theta$  ni tasvirlaydi. Maksimal qiymat  $P_{max} \approx 0,94 - 90^\circ$  da kuzatilib, bu POLDER polarimetriya ma'lumotlarini  $1,5\%$  aniqlikda takrorladi. Aerosol qo'shilganda Mie faza funksiyasi sababli  $P_{max} = 20-30\%$  ga susaydi hamda cho'qqi burchagi  $100-110^\circ$  ga siljidi; bu inversiya protsedurasida zarracha radiusining  $r^* = 0,18 \pm 0,02\mu\text{m}$  va murakkab indeksining  $m = 1,50 - 0,015i$  deb baholanishiga olib keldi.



Umuman, optik qalinlikdagi  $\pm 10\%$

noaniqlik model intensivitetiga  $6\%$ , qutblanishiga esa atigi  $3\%$  ta'sir ko'rsatdi; bu polarimetrik kuzatuvlarning aerosol teskari masalasida yuqori barqarorlikka ega ekanligini tasdiqlaydi. Natijalar masofaviy zondlashda samarali AOD va yer-sirt albedosini bir vaqtning o'zida tiklash imkonini kengaytiradi.

### XULOSALAR

Tadqiqot atmosferada quyosh nurlanishining uzatilishi, sochilishi va yutilishini tekis-qatlamli model asosida tahlil qilib, optik parametrlarning spektral va burchak xususiyatlarini aniq ifodaladi. Hisob-kitoblar shuni ko'rsatdiki, musaffo sharoitda (Rayleigh sochilishi)  $0,4-0,7\mu\text{m}$  diapazonida o'tkazuvchanlik  $70-80\%$  atrofida bo'lib qoladi, ammo yuqori aerosol konsentratsiyasida u  $20\%$  gacha keskin kamayadi; demak, aerosollar Yer sirtiga yetib keladigan quyosh energiyasini sezilarli darajada kamaytiradi.

Rayleigh sochilishida maksimal qutblanish  $P_{max} \approx 0,94 90^\circ$  burchakda kuzatildi, aerosol qo'shilganda esa bu qiymat  $30\%$  gacha pasaydi va cho'qqi burchagi siljidi. Optik qalinlikdagi  $\pm 10\%$  xato intensivlikni  $6\%$ , qutblanishni esa faqat  $3\%$  o'zgartirishi modelning polarimetrik

## FIZIKA-TEXNIKA

barqarorligini tasdiqlaydi. Ushbu natijalar masofaviy zondlash protseduralarida aerosol optik qalinligi, zarracha o'lchami va yer-sirt albedosini bir vaqtda qayta tiklash imkoniyatlarini kengaytiradi hamda iqlim modellarida radiatsion balansni aniqlashda ishonchli parametrizatsiya bazasini ta'minlaydi.

**ADABIYOTLAR RO'YHATI**

1. Chandrasekhar, S. *Radiative Transfer*. Oxford: Clarendon Press, 1950.
2. Van de Hulst, H.C. *Light Scattering by Small Particles*. New York: Wiley, 1957.
3. Elterman, L. *UV, Visible and IR Attenuation for Altitudes to 50 km*. AFCRL Environmental Research Paper 258, Bedford (MA), 1968.
4. Kerker, M. *The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation*. New York: Academic Press, 1969.
5. Hänel, G. "The Properties of Atmospheric Aerosol Particles as Functions of Relative Humidity." *Advances in Geophysics* 19 (1976): 73-188.
6. Goody, R.M. *Atmospheric Radiation I: Theoretical Basis*. Oxford: Clarendon Press, 1964.
7. Hale, G.M., and M.R. Query. "Optical Constants of Water in the 200nm to 200µm Wavelength Region." *Applied Optics* 12 (1973): 555-563.
8. Sekera, Z. "Recent Developments in the Study of the Polarization of Skylight." *Advances in Geophysics* 3 (1956): 43-104.
9. Patterson, E.M. "Imaginary Part of the Refractive Index of Mount St. Helens Ash between 300 and 700 nm." *Science* 214 (1981): 836-838.
10. Mason, B.J. *The Physics of Clouds*. Oxford: Clarendon Press, 1971.