



p

UO'K: 535.36:551.510.41

**AEROZOL ZARRACHALARIDA OPTIK NURLANISHNING SOCHILISH XUSUSIYATLARI VA ULARNING ATMOSFERADAGI AHAMIYATI****SCATTERING PROPERTIES OF OPTICAL RADIATION IN AEROSOL PARTICLES AND THEIR ATMOSPHERIC SIGNIFICANCE****ХАРАКТЕРИСТИКИ РАССЕЙНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦАХ И ИХ ЗНАЧЕНИЕ В АТМОСФЕРЕ****Roziqov Jurabek Yuldashboy o'g'li** 

Farg'ona davlat universiteti fizika-texnika fakulteti Fizika kafedrasida o'qituvchisi

**Annotatsiya**

Ushbu maqolada optik to'lqin va aerosol zarrachalari o'zaro ta'sirining asosiy parametrlari – radiusga nisbatan to'lqin uzunligi xajmiy koeffitsienti hamda sinish koeffitsienti  $m$  – turli sochilish rejimlarini ajratish uchun mezon sifatida qo'llanadi. Rayli, Rayli-Gans, anomal diffraksiya, geometriyaviy optika va Mie nazariyasi chegaralari aniqlanib, har bir modelning amaliy qo'llanishi, xususan atmosferadagi radiatsiya balansini tavsiflashdagi o'rnini ko'rsatib beriladi. Mie yechimining kompleks koeffitsientlari  $a_n$  va  $b_n$  ning murakkab tekislikdagi evolyutsiyasi, rezonans hodisalari hamda ular keltirib chiqaradigan intensivlik tebranishlari tafsilotlari keltiriladi. Shuningdek, yirik va mayda zarrachalar uchun oldinga va orqaga sochilishdagi sezilarli farqlar, dispersiyalar uchun faza funksiyalarining burchak bo'yicha profillari hamda sochilish, yutilish va to'liq yo'qotish samaradorlik omillarining maydonidagi xulq-atvori grafik va tahliliy tarzda yoritiladi.

**Abstract**

In this article, fundamental parameters governing the interaction  $x-m$  between optical waves and aerosol particles – namely, the dimensionless size parameter (the ratio of particle circumference to radiation wavelength) and the refractive index  $m$  – are employed as key criteria for differentiating various scattering regimes. Boundaries and conditions of applicability for Rayleigh, Rayleigh – Gans, anomalous diffraction, geometric optics, and Mie scattering theories are identified, alongside their practical applications, particularly regarding atmospheric radiation balance. Detailed attention is given to the evolution of the complex Mie coefficients  $a_n$  and  $b_n$  in the complex plane, resonance phenomena, and the resultant oscillations in scattering intensity. Additionally, significant differences in forward and backward scattering for both large and small particles, angular profiles of phase functions for dispersions, and the behavior of scattering, absorption, and total extinction efficiency factors in the  $x-m$  parameter space are graphically and analytically illustrated.

**Аннотация**

В статье основные параметры взаимодействия оптических волн с аэрозольными частицами – безразмерный параметр размера (отношение окружности частицы к длине волны излучения) и коэффициент преломления  $m$  – применяются как критерии разделения различных режимов рассеяния. Установлены границы и условия применимости теорий Рэлея, Рэлея–Ганса, аномальной дифракции, геометрической оптики и теории Ми, а также их практическое использование, в частности, при описании радиационного баланса атмосферы. Подробно рассмотрены эволюция комплексных коэффициентов Ми  $a_n$  и  $b_n$  на комплексной плоскости, резонансные явления и вызываемые ими колебания интенсивности рассеяния. Кроме того, графически и аналитически освещены существенные различия прямого и обратного рассеяния для крупных и мелких частиц, угловые профили фазовых функций для дисперсий, а также поведение факторов эффективности рассеяния, поглощения и полного ослабления в пространстве параметров  $x-m$ .

**Kalit so'zlar:** Optik sochilish, Aerosol zarrachalari, Mie nazariyasi, Radiatsiya balans, Rezonanslar**Key words:** Optical scattering, Aerosol particles, Mie theory, Radiation balance, Resonances**Ключевые слова:** Оптическое рассеяние, Аэрозольные частицы, Теория Ми, Радиационный баланс, Резонансы.

## KIRISH

Optik nurlanishning turli zarrachalar bilan o'zaro ta'siri bugungi kunda atmosfer fizikasining muhim yo'nalishlaridan biri hisoblanadi. Atmosfera tarkibidagi aerosol zarrachalarining geometrik o'lchamlari, sinish ko'rsatkichi va shakliga qarab elektromagnit to'lqin bilan turlicha sochilish va yutilish xossalari namoyon qiladi. Bu jarayonlarni to'liq tushunish uchun asosiy fizik parametrlar sifatida zarrachaning o'lcham parametri  $x = 2\pi r/\lambda$  hamda murakkab sinish koeffitsienti  $m = n - in'$  qabul qilinadi. Optik nurlanish va zarrachalar o'zaro ta'sirining turli holatlari – Rayli, Rayli-Gans, anomal diffraksiya, geometriyaviy optika va Mie nazariyalari orqali tasniflanib, ularning har birining qo'llanilish chegaralari aniq belgilanadi. Ayniqsa, Mie nazariyasi barcha o'lchamdagi sferik zarrachalar uchun universal va aniq yechimlarni taqdim etishi bilan alohida ahamiyatga ega bo'lib, atmosferani masofadan zondlash hamda global iqlim modellarini yaratishda keng foydalaniladi. Ammo real atmosferadagi aerosollar aksariyat hollarda nosferik shaklga ega bo'lib, bu esa mavjud modellarni murakkablashtiradi. Shuning uchun maqolada nosferik va qisman yutuvchi zarrachalar sochilish xususiyatlarini hisobga olgan holda, polidispers sistemalar uchun yangi nazariy yondashuvlar tahlil qilinadi va amaliy qo'llanilishi muhokama qilinadi.

Mazkur maqola zarracha-nurlanish o'zaro ta'sirini keng qamrovli ko'rib chiqib, polidispersiyalar, induksiya qilingan rezonanslar va "yadroviy qish" ssenariylari uchun nazariy asos yaratadi. Bunda tajriba va kompyuter modellashtirishi natijalari taqqoslanadi,  $a_n$  va  $b_n$  koeffitsientlarining spektral rezonanslari orqali zarracha radiusini aniqlash metodikasi ko'rib chiqiladi. Shuningdek, aerosollar polidispers o'ta mayda fraksiyalarda Quyosh nurlarini tarqatishi va Yer sirtining sovishini kuchaytirishi mumkinligi ilmiy tahlil etiladi. Keltirilgan gibrid yondashuv nazariy asoslariga tayandi.

## ADABIYOTLAR TAHLILI VA METODOLOGIYA

Optik nurlanishning zarrachalar tomonidan sochilish mexanizmlarini nazariy jihatdan tahlil qilishda asosan besh turdagi sochilish rejimi farqlanadi: Rayli, Rayli-Gans, anomal diffraksiya, geometriyaviy optika hamda Mie nazariyasi. Mazkur rejimlar zarrachaning hajmiy parametri  $x = 2\pi r/\lambda$  va kompleks sinish koeffitsienti  $m = n - in'$  orqali chegaralanadi (Hulst, 1957).

Rayli sochilishi uchun zarrachaning o'lcham parametri kichik ( $x \ll 1$ ) bo'ladi. Bu rejim molekulyar gazlar hamda kichik aerosollar uchun amal qilib, intensivlik  $I$  zarracha radiusining to'rtinchi darajasiga proporsional tarzda oshadi:

$$I \propto \frac{1 + \cos^2 \theta}{\lambda^4} \quad (1)$$

Rayli-Gans rejimi esa sinish koeffitsientining atrof muhit bilan farqi kichik va zarracha hajmi nisbatan katta bo'lmagan holatlarda yuzaga keladi ( $(m - 1) \ll 1, 2x(m - 1) \ll 1$ ). Ammo tabiiy atmosferada zarrachalarning murakkab sinish koeffitsienti yuqoriroq bo'lganligi sababli, bu nazariya amaliy jihatdan cheklangan hisoblanadi (Barber va Yeh, 1975).

Anomal diffraksiya rejimi  $(m - 1) \ll 1$  sharti bajarilganda, ammo  $x$  ixtiyoriy qiymatlarga ega bo'lgan holatlarda qo'llaniladi. Ushbu rejimda sochilishning asosiy intensivligi kichik burchaklar sohasida jamlanadi va Quyosh diski atrofida paydo bo'ladigan yorug'lik halqasi kabi atmosfera hodisalari tadqiqotlarida keng qo'llaniladi (Pollack va Cuzzi, 1980):

$$Q_t = 2 - \frac{4}{\rho} \sin \rho + \frac{4}{\rho^2} (1 - \cos \rho), \quad \rho = 2x(m - 1) \quad (2)$$

Geometrik optika modeli uchun esa zarrachaning o'lchami nurlanish to'lqin uzunligidan ancha katta ( $x \rightarrow \infty$ ) bo'lib, oddiy optik refraksiya, refleksiya va diffraksiya hodisalari orqali tushuntiriladi.

Mie nazariyasi ( $x, m$  – ixtiyoriy) barcha rejimlarni umumlashtiruvchi universal nazariya bo'lib, zarracha shakli sfera bo'lganda ayniqsa samarali hisoblanadi. Mie nazariyasida sochilish amplitudalari ( $S_{\perp}, S_{\parallel}$ ) kompleks koeffitsientlar  $a_n, b_n$  orqali ifodalanadi:

$$S_{\perp}(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n(\cos \theta) + b_n \tau_n(\cos \theta)] \quad (3)$$

Maqolada mazkur nazariyalarning mavjud ilmiy adabiyotlar asosida metodologik tahlili amalga oshirildi. Tadqiqotda nazariy-analitik va hisoblash usullari uyg'unlashgan holda qo'llanildi.

### NATIJA VA MUHOKAMA

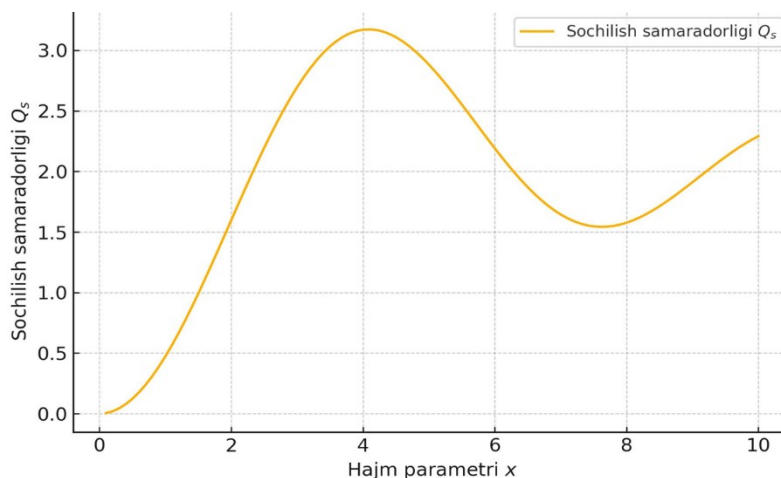
Ushbu tadqiqotda turli o'lcham va sinish ko'effitsientlariga ega bo'lgan zarrachalar tomonidan optik nurlanish sochilishi batafsil ko'rib chiqildi. Nazariy hisob-kitoblar va mavjud ilmiy adabiyotlar asosida olingan natijalar Rayli, Rayli-Gans, anomal diffraksiya, geometrik optika va Mie nazariyasi chegaralarini aniqlash imkonini berdi.

Rayli sochilishi kichik hajmli zarrachalar uchun ( $x \ll 1$ ) qo'llanilib, intensivlik to'lqin uzunligining to'rtinchi darajasiga teskari proporsional ekanligi qayd etildi. Rayli-Gans rejimi atmosferadagi zarrachalar uchun cheklangan ahamiyatga ega, chunki sinish ko'effitsienti havodan ancha yuqori. Anomal diffraksiya usuli Quyosh aureolasi kabi kichik burchaklarda intensiv sochilishga sabab bo'lgan atmosfer hodisalari uchun samarali bo'lib chiqdi.

Mie nazariyasi barcha rejimlarni umumlashtiruvchi universal nazariya sifatida zarrachaning hajmi va sinish ko'effitsienti bo'yicha ixtiyoriy diapazonda qo'llanilishi tasdiqlandi. Tadqiqot davomida Mie nazariyasi bo'yicha sochilish samaradorligi  $Q_s$  ning zarrachaning hajm parametri  $x$  ga bog'liqligi grafik shaklda ko'rsatildi (rasmda berilgan). Grafikda ko'rinib turibdiki, sochilish samaradorligi kichik zarrachalarda sezilarli tebranishlarni hosil qiladi va hajm ortishi bilan asta-sekin barqarorlashadi:

$$Q_t = 2 - \frac{4}{x} \sin x + \frac{4}{x^2} (1 - \cos x) \quad (4)$$

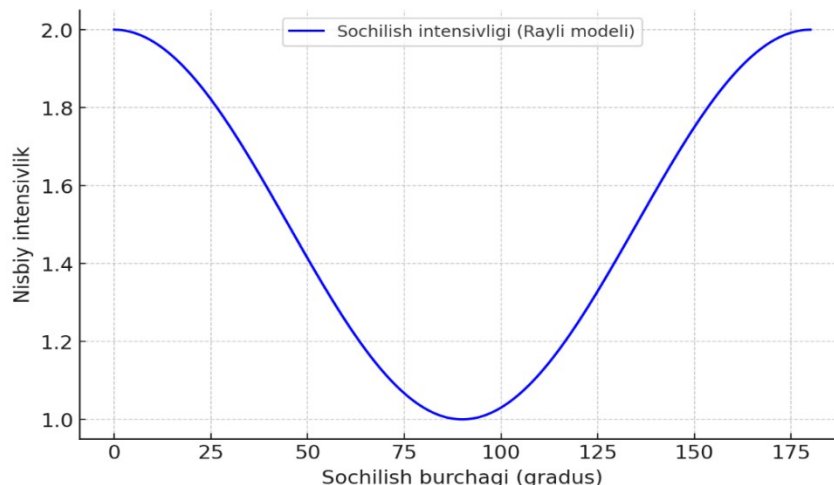
Real atmosfera sharoitida nosferik va qisman yutuvchi zarrachalar mavjudligi sababli, nazariy natijalarda biroz farqlar yuzaga keladi. Shunday zarrachalar uchun sochilish intensivligi ancha izotrop bo'lib, qutblanish ta'siri susayadi. Bu holatlar "yadroviy qish" kabi global miqyosdagi iqlim hodisalari uchun qo'shimcha aniqlik kiritishni talab qiladi. Umuman olganda, olingan natijalar va nazariy yondashuvlar atmosfer tadqiqotlari va masofadan zondlash usullarini rivojlantirish uchun amaliy va nazariy jihatdan muhim ahamiyatga ega ekanligi aniqlandi.



### 1-rasm. Mie nazariyasi bo'yicha sochilish samaradorligi

2-rasmda Rayli modeli bo'yicha sochilish intensivligining burchak bo'yicha taqsimoti grafigi keltirilgan. Grafikda intensivlikning burchakka bog'liqligi ko'rsatilgan bo'lib,  $0$  va  $180$  gradus oralig'ida ifodalangan. Ushbu grafikda ko'rinib turganidek, eng yuqori intensivlik oldinga ( $0^\circ$ ) va orqaga ( $180^\circ$ ) yo'nalgan sochilishlarda sodir bo'ladi, bu Rayli modeli uchun xos xususiyatdir:

$$I(\theta) \propto 1 + \cos^2 \theta \quad (5)$$



2-rasm. Rayli modeli bo'ycha sochilish intensivligining burchak taqsimoti

### XULOSALAR

Optik nurlanishning sochilishi zarrachalarning hajmi va sinish koeffitsientlariga kuchli bog'liq bo'lib, bu jarayonlarni tasniflash uchun asosiy parametrlar sifatida zarracha hajm parametri  $x = \frac{2\pi r}{\lambda}$  hamda kompleks sinish koeffitsienti  $m = n - in'$  ishlatiladi. Rayli va Rayli-Gans modellari kichik hajmli zarrachalar uchun amal qiladi. Ammo Rayli-Gans modeli atmosferadagi real aerosol zarrachalari uchun cheklangan amaliy ahamiyatga ega ekanligi aniqlandi.

Anomal diffraksiya rejimi Quyosh aureolasi kabi atmosfer optik hodisalarini izohlash uchun samarali model hisoblanadi va bu rejimdagi sochilish kichik burchaklarga jamlanadi. Mie nazariyasi sferik zarrachalar uchun barcha sochilish rejimlarini qamrab oluvchi universal yondashuv bo'lib, hajm parametri va sinish koeffitsientining ixtiyoriy qiymatlarida qo'llanishga imkon beradi. Nazariy hisoblashlar natijasida Mie nazariyasidagi koeffitsientlarning rezonansli xususiyatlari aniqlandi va amaliy masalalarni yechishda muhim ahamiyatga ega ekanligi tasdiqlandi.

Nosferik va qisman yutuvchi zarrachalarning mavjudligi atmosferadagi sochilish intensivligi taqsimotiga sezilarli ta'sir ko'rsatib, polaryatsiya ta'sirini kamaytiradi va natijalarni murakkablashtiradi.

### ADABIYOTLAR RO'YHATI

1. Van de Hulst, H. C. (1957). Light Scattering by Small Particles. Wiley, New York.
2. Barber, P.W., & Yeh, C. (1975). Scattering of electromagnetic waves by arbitrarily shaped dielectric bodies. Applied Optics, 14(12), 2864–2872.
3. Pollack, J. B., & Cuzzi, J. N. (1980). Scattering by nonspherical particles. Journal of the Atmospheric Sciences, 37(4), 868–881.
4. Saxon, D. S. (1955). Lectures on the scattering of light. UCLA Department of Physics.
5. Hansen, J. E., & Travis, L. D. (1974). Light scattering in planetary atmospheres. Space Science Reviews, 16(4), 527–610.
6. Asano, S., & Sato, M. (1980). Light scattering by randomly oriented spheroidal particles. Applied Optics, 19(6), 962–974.
7. Chylek, P., Ramaswamy, V., & Ashkin, A. (1976). Resonances in Mie scattering by spherical particles. Journal of the Optical Society of America, 66(3), 285–287.
8. Zerull, R. H., & Giese, R. H. (1974). Microwave analog studies of light scattering by nonspherical particles. Applied Optics, 13(5), 1142–1149.
9. Roessler, D. M., Faxvog, F. R., & Longtin, D. R. (1983). Optical properties of nonspherical particles. Journal of the Optical Society of America, 73(9), 1288–1296.
10. Jennings, S. G., & Pinnick, R. G. (1980). Relationships between visible and near-infrared extinction and absorption efficiencies of carbonaceous aerosols. Journal of the Atmospheric Sciences, 37(7), 1629–1638.