



УДК 551.521.3

КАЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ФУНКЦИИ ЭКСТИНКЦИИ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО АЭРОЗОЛЯ ПО ТЕОРИИ МИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К БЕРЕГОВЫМ ЗОНАМ

Х. Г. Асадов¹, Б. М. Азизов², Х. С. Халилова²¹ Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика² Национальная академия авиации, г. Баку, Азербайджанская Республика

Сформулирована и решена задача качественной оценки функции эффективности экстинкции мелкодисперсного атмосферного аэрозоля в береговой зоне полученной по теории Ми. Критерием качества функции эффективности является достижение коэффициентом экстинкции минимума. Приведено решение задачи от обратного, т.е. вычислена зависимость оптимальной функции эффективности экстинкции от показателя распределения аэрозольных частиц и их радиуса при постоянной величине длины волны проводимых измерений при экспериментально установленном ограничительном условии. Определено, что вычисленная оптимальная функция эффективности экстинкции, приводящая к минимуму значения коэффициента экстинкции является фактически инверсной экспериментально полученной функции эффективности в зоне действия принятого ограничительного условия. На основе этого факта дана качественная оценка формулы функции эффективности экстинкции Ми.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АЭРОЗОЛЬ, ЭКСТИНКЦИЯ, ИЗМЕРЕНИЯ, ДЛИНА ВОЛНЫ, АТМОСФЕРА

DOI 10.5425/2304-7380_2022_33_24

<https://elibrary.ru/chxa iy>

1. ВВЕДЕНИЕ

Как отмечается в работе [1], прибрежные регионы являются важным источником эмиссии в атмосферу антропогенного типа мелкодисперсного аэрозоля. Согласно [2] аэрозоль играет важную роль в энергобалансе и в гидрологическом цикле Земли путем рассеяния и поглощения оптической радиации. Аэрозоль также воздействует на микрофизические свойства облаков, что характеризуется как косвенное воздействие аэрозоля на энергобаланс в атмосфере.

Согласно [3-10], аэрозоль береговой зоны является комплексной смесью аэрозолей, сгенерированной под воздействием волн и ветра, а также континентальной составляющей, являющейся суммой природных и антропогенных типов аэрозоля.

Как отмечается в работе [11], аэрозоль также уменьшает видимость в области видимых и инфракрасных волн. В береговых зонах тип аэрозоля в морской граничной зоне во многом зависит от направления и длительности ветра [12]. Вышесказанное указывает на актуальность проведения исследований аэрозоля в прибрежных зонах.



В работе [11] изложены результаты проведенных исследований по изучению динамики морского аэрозоля в береговых зонах с использованием перестраиваемого лидара типа FLS-12. Измерения проводились на длинах волн 440, 560 и 670 нм. Далее воспользуемся результатами этой работы.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Согласно [13], теория Ми позволяет определить поперечное сечение рассеяния σ_s , поперечное сечение поглощения σ_a и поперечное сечение экстинкции σ_e , а также фазовую функцию рассеяния.

Рассмотрим функцию эффективности экстинкции аэрозоля, которая согласно теории Ми определяется как

$$Q_e = \frac{2}{\chi^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(a_n + b_n) \quad (1)$$

где χ – параметр размера, определяемая как

$$\chi = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (2)$$

где r – радиус частицы;

λ – длина волны;

a_n, b_n – коэффициенты Ми.

При этом поперечное сечение экстинкции σ_e определяется как

$$\sigma_e = \pi r^2 Q_e \quad (3)$$

Интегрирование (3) в диапазоне $r_1 \div r_2$ дает нам коэффициент экстинкции

$$K_e = \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_e N(r) dr \quad (4)$$

Вместе с тем, согласно [3], имеет место следующее определение K_e

$$K_e = \int_{r_1}^{r_2} N(r) Q_e \left(\frac{2\pi r}{\lambda}, m \right) \pi r^2 dr \quad (5)$$

где m – индекс рефракции, который согласно [3] в диапазоне длин волн $0.4 < \lambda < 1.0$ мкм можно считать, что является постоянной величиной.

Согласно [11], для береговой зоны имеется более компактное выражение

$$K_e = \int_{r_1}^{r_2} Q_e(r, \lambda) \cdot S(r) dr \quad (6)$$

где a, b – показатели распределения частиц.

Вопрос исследования сформулируем следующим образом:

Является ли выражение (1) оптимальным для функционала (6), при некоторых ограничительных условиях налагаемых на $Q_e(r, \lambda)$, при фиксированной длине волны. Здесь под оптимальностью выражения (1) подразумевается выполнение условия $K_e \rightarrow \min$, т. е. аэрозоль должен оказывать минимальное воздействие на прохождение оптических лучей.

3. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Прежде всего проанализируем дополнительные ограничительные условия, налагаемые на $Q_e(r, \lambda)$.

Согласно работе [14], исследование эффективности экстинкции в качестве функции параметра размера для мелкодисперсного аэрозоля из смеси сульфата аммония и Родамина 590 в различных пропорциях (10:1, 50:1, 100:1, 500:1) показало, что соответствующие характеристики с некоторым приближением подчиняются следующему условию

$$\int_{x_1}^{x_2} Q_e(x, \lambda) dx = C; C = const \tag{7}$$

Вышеуказанные кривые показаны на рис. 1. Для случая фиксированной длины волны условие (7) имеет вид

$$\int_{r_1}^{r_2} Q_e(r) dr = C \tag{8}$$

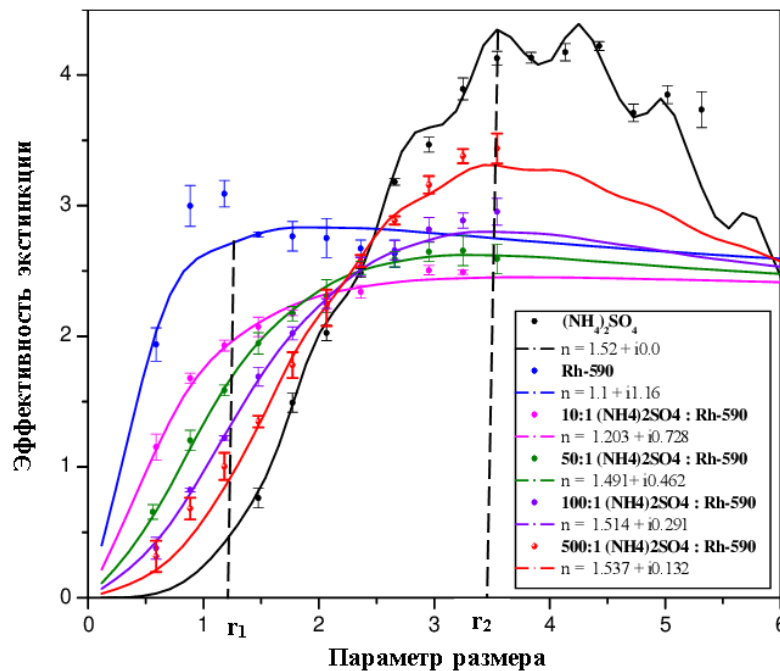


Рис. 1. Зависимость эффективности экстинкции аэрозоля из смеси сульфата аммония и родамина 590 от значения параметра размера для разных пропорций смеси [14]

Для рассматриваемой задачи качественной оценки эффективности теории Ми эффективность формулы (1) применительно к расчету коэффициента экстинкции по формуле (6) будем понимать в том смысле, что приводит ли решение (1) к минимуму следующего целевого функционала эффективности (при $\lambda=const$) соответствующего задаче Лагранжа [15].

$$K_e = \int_{r_1}^{r_2} Q_e(r, \lambda) \cdot S(r) dr + \gamma \left[\int_{r_1}^{r_2} Q_e(r, \lambda) dr - C \right] \tag{9}$$

Далее предлагается решение поставленного вопроса от обратного, т.е. задача оптимизации (9) решается методом вариационного исчисления на минимум, и если полученное решение совпадает с (1) то решение Ми данной задачи считается эффективной. Рассмотрим решение задачи (9).

4. РЕШЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ

Изложим предлагаемый метод нахождения зависимости Q от r , при которой K_e достиг бы минимального значения.

Предлагаемый метод основывается на следующих положениях:

1. Вводится на рассмотрение показатель $G(r_i, \lambda)$, определяемый как

$$G(r) = \sqrt{Q(r, \lambda)} \quad (10)$$

Следовательно,

$$Q(r) = G^2(r) \quad (11)$$

2. Допускается [14], что имеет место равенство

$$\int_{r_1}^{r_2} G(r) dr = C; C = \text{const} \quad (12)$$

С учетом выражений (9), (10), (11), (12) составляется задача безусловной вариационной оптимизации, математическое выражение которого имеет вид

$$K_e = \int_{r_1}^{r_2} G^2(r) \cdot S(r) dr + \gamma \left[\int_{r_1}^{r_2} G(r) dr - C \right] \quad (13)$$

Таким образом, следует вычислить функцию $G(r, \lambda)$, при которой $K_e \rightarrow \min$. Согласно [15], решение задачи (5), должно удовлетворить условию

$$\frac{d\{G^2(r) \cdot S(r) dr + \gamma G(r)\}}{dG(r)} = 0 \quad (14)$$

Из (14) получим

$$2G(r) \cdot S(r) + \gamma = 0 \quad (15)$$

Из (15) находим

$$G(r) = -\frac{\gamma}{2S(r)} \quad (16)$$

С учетом (12) и (16) получаем

$$-\int_{r_1}^{r_2} \frac{\gamma}{2S(r)} dr = C \quad (17)$$

Из (17) находим

$$\gamma = -C / \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{2S(r)} \quad (18)$$

С учетом (16) и (18) получим:

$$G(r) = \frac{C / \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{S(r)}}{4S(r)} \quad (19)$$

Согласно [11] имеем

$$S(r) = ar^2 \exp(-br) \quad (20)$$

где a, b – параметры распределения.
С учетом (19), (20) получим

$$G(r) = \frac{C / \int_{r_1}^{r_2} \frac{\exp(br)}{r^2} dr}{4 \cdot r^2 \exp(-br)} \quad (21)$$

Примем

$$C / \int_{r_1}^{r_2} \frac{\exp(br)}{r^2} dr = C_1; \quad C_1 = const \quad (22)$$

С учетом (21) и (22) получим математическое выражение оптимальной функции $G(r)$ при которой $K_e \rightarrow \min$.

$$G(r)_{opt} = \frac{C_1 \cdot \exp(br)}{4r^2} \quad (23)$$

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ПОЛУЧЕННОГО РЕШЕНИЯ

Таким образом, как видно из выражения (23) имеет экстремум от r . Определим условие этого экстремума. Имеем

$$\frac{dG(r)}{dr} = \frac{C_1 \cdot b \cdot \exp(br)}{4r^2} - \frac{2C_1 \cdot \exp(br)}{4r^3} \quad (24)$$

С учетом

$$\frac{dG(r)}{dr} = 0$$

Из (24) находим

$$r = \frac{2}{b} \quad (25)$$

Следовательно, при условии (25) функция $G(r)$ достигает экстремума.
Определим тип экстремума. Вычислим

$$\frac{d^2G(r)}{dr^2}$$

Имеем:

$$\frac{d^2G(r)}{dr^2} = \frac{C_1 \cdot b^2 \cdot \exp(br)}{4r^2} - \frac{2C_1 \cdot \exp(br)}{4r^3} - \frac{2C_1 \cdot \exp(br)}{4r^3} + \frac{21C_1 \cdot \exp(br)}{4r^2} \quad (26)$$

Из (26) получаем следующее условие минимума:

$$b^2 - \frac{4b}{r} + \frac{6}{r^2} > 0 \quad (27)$$

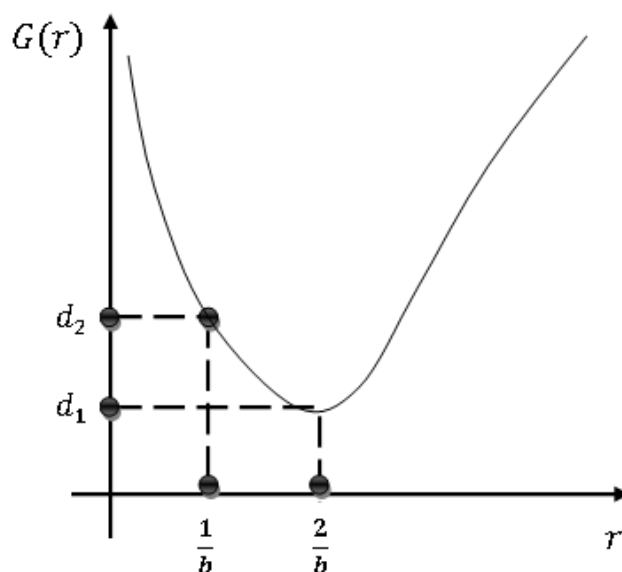


Рис. 2. Условное графическое обозначение оптимальной функции (23)

$$\text{Принятые обозначения: } d_1 = \frac{c_1 e^2 b^2}{16}; d_2 = \frac{c_1 e b^2}{4}$$

Следовательно, условие (27) выполняется всегда, т. е. решение (23) при (25) достигает минимума. Следует отметить, что обнаруженный факт наличия такого минимума также подтверждается результатами работы [14].

Условный график функции $G(r)$ показан на рис. 2.

С учетом выражений (11) и (23) можно заключить, что при удовлетворении условия

$$Q(r) = \frac{C_1^2 \exp(2br)}{16r^4} \quad (28)$$

коэффициент экстинкции достигнет минимальной величины.

6. КАЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВЫРАЖЕНИЯ ФУНКЦИИ ЭКСТИНКЦИИ АТМОСФЕРНОГО МЕЛКОДИСПЕРСНОГО АЭРОЗОЛЯ ПО ТЕОРИИ МИ

Согласно вышеприведенному определению качественной оценки следует определить, приводит ли решение (1), (2) к экстремуму функционала (5).

Задача качественной оценки решена от обратного и получено математическое выражение экстремума функционала (5) в виде (20). Для решения задачи качественной оценки воспользуемся результатом исследования эффективности экстинкции сульфат аммония [14] (рис. 3).

Сравнение графиков, показанных на рисунках 1, 2 и 3 приводит к заключению о том, что характерный экспериментальный минимум подпадает в зону, где $\chi = 7$, в то время как условие (7), важное для получения решения (23) выполняется в зоне $1 < \chi < 3.5$.

В тоже время оптимальное, в выше указанном смысле решение (15) имеет минимум в точке $2/b$. С учетом $b = 2$ [11], этот минимум попадает в точку $\chi = 1$, т. е. при $\lambda = 350$ нм [14] получаем $\chi \approx 3 \div 4$.

Следовательно, можно заключить, что оптимальное решение (15) является инверсией кривой, показанной на рис. 3. На этой основе можно заключить, что в диапазоне $\chi = 1 \div 3.5$ формула (1) качественно неэффективна, т. е. не приводит к минимуму значения коэффициента экстинкции, в зоне $\chi = 1 \div 3.5$, где выполняется условие (8).

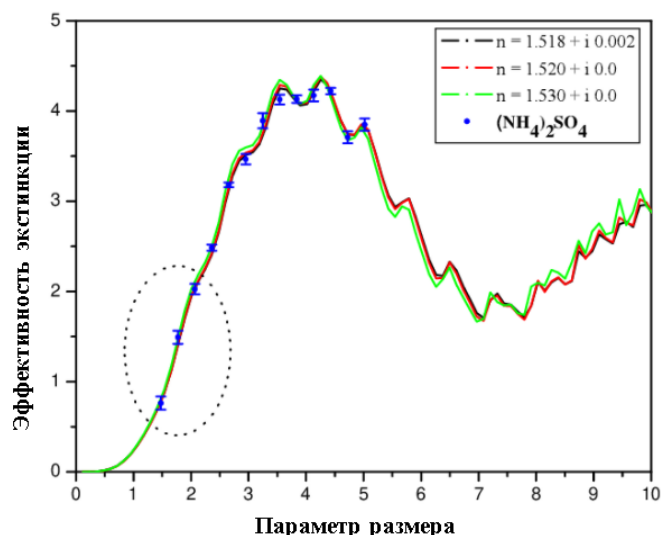


Рис. 3. Кривая зависимости эффективности экстинкции аэрозоля сульфата аммония от параметра размера [14]

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, сформулирована и решена задача качественной оценки формулы Ми функции эффективности экстинкции в зоне параметра размера, где интеграл этой функции постоянная величина. На основе решения вариационной оптимизационной задачи получено расчетная аналитическая зависимость оптимальной функции эффективности экстинкции от показателя распределения аэрозольных частиц (b) и радиуса этих частиц при постоянном значении длины волны проводимых измерений. Показано, что оптимальная расчетная функция эффективности экстинкции, приводящая к минимуму значения коэффициента экстинкции, имеет минимум от r , при этом значение r , при котором достигается указанный минимум, определяется как $r = 2/b$, где b – показатель распределения аэрозольных частиц. Сопоставление расчетных и экспериментальных кривых позволяет сделать вывод о том, что формула Ми функции эффективности экстинкции в указанной мелкодисперсной зоне параметра размера не приводит к минимуму коэффициента экстинкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Anderson J. C., Wang J., Zeng J., Leptoukh G., Petrenko M., Ichoku C., Hu C. Long – team statistical assessment of Aqua – MODIS aerosol optical depth over coastal regions: bias characteristics and uncertainty sources. https://eas2.unl.edu/~jwang/docs/publication/paper_pdf/2013/Anderson_2013.pdf
2. Charlson R., Shwartz S., Hale J., Cess R., Coakley J. Climate foreign by anthropogenic aerosols// Science. 1992. Vol. 255. Pp. 423-430.
3. Piazzola J., Kaloshin G., De Leeuw G., Eijik A. M. J. V. Aerosol extinction in coastal zone. Adaptive Systems VII, 2004 - spiedigitallibrary.org
4. Gathman S. G. Optical properties of the marine aerosol as predicted by the Navy aerosol model// Op. Eng. 1983. Vol. 22. Pp. 57-62.
5. Tanguy M. H., Bonhommet M., Autric L., Vigliano P. Correlation between the aerosol profiles measurements, the meteorological conditions and the atmospheric I. R. transmission in a Mediterranean atmosphere// SPIE Proceedings, 1487. 1991. Pp. 172-184.
6. Eijik A. M. J. V., De Leeuw G. Modeling aerosol particle size distributions over the North Sea// J. Geophys. Res. Vol. 97. No. C9. 1992. Pp. 14417-14429.
7. Piazzola J., Bouchara F., Eijik A. M. J. V., De Leeuw G. Development of the Mediterranean extinction code MEDEX// Optical Engineering. 2003. Vol. 42. No. 4. Pp. 912-924.
8. Volz F. E., Kaloshin G. Evaluation of the performance of the aerosol extinction code “Medex” in the Black Sea coast// J. Aerosol Science. 2004.

9. *Mallet M., Roger J. C., Despiau S., Dubovik O., Putaud J. P.* Microphysical and optical properties of aerosol particles in urban zone during ESCOMPTE// Atmospheric Research. 2003. Vol. 69. Pp. 73-97.
10. *Piazzola J., Eijik A. M. J. V., De Leeuw G.* An extension of the Navy Aerosol Model to coastal areas// Opt. Eng. 2000. Vol. 39. Pp. 1620-1631.
11. *Zielinski T., Petelski T.* Studies of aerosol physical properties in the coastal area// Optica Applicata. 2006. Vol. XXXVI. No. 4.
12. *Petelski T., Chomka M.* Sea salt emission from the coastal zone// Oceanologia. 2000. Vol. 42(4). Pp. 399-410.
13. *Swetha G., Varadarjan S., Kesarkar A. P.* Impact of aerosol in the atmosphere using Mie scattering// International Journal of Advanced Research in Computer and communication Engineering. December 2015. Vol. 4. Issue 12.
14. *Abo Riziq, Carynelisa Haspel, Emtiaz Dinar, Yinon Rudich.* Optical properties of absorbing and non-absorbing aerosols retrieved by cavity ring down (CRD) spectroscopy. Atmospheric Chemistry and Physics. 10.5194/acp-7-1523-2007 March 2007
15. *Эльсгольц Л.Э.* Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. 1974. М. Наука. 432 стр.

QUALITATIVE ASSESSMENT OF THE EXTINCTION FUNCTION OF FINE AEROSOL ACCORDING TO THE THEORY OF MIE APPLIED TO COASTAL ZONES

Asadov H. H., Azizov B. M., Khalilova H. S.

The problem of qualitative evaluation of the extinction efficiency function of fine atmospheric aerosol in the coastal zone obtained according to the Mie theory is formulated and solved. The criterion for the quality of the efficiency function is to reach the minimum of extinction coefficient. The solution of the inverse problem is given, i.e. the dependence of the optimal extinction efficiency function on the distribution index of aerosol particles and the radius of these particles at a constant wavelength of the measurements carried out under an experimentally established limiting condition is calculated. It is determined that the calculated optimal extinction efficiency function, which minimizes the extinction coefficient value, is actually the inverse of the experimentally obtained efficiency function under accepted restrictive condition. Based on this fact, a qualitative assessment of the formula of the extinction efficiency function is given.

KEYWORDS: AEROSOL, EXTINCTION, MEASUREMENTS, WAVELENGTH, ATMOSPHERE