
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 551.501.7
DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-5-376-383

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА ЧАСТИЦЕЙ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ

И. А. ПОТАПОВА, А. П. БОБРОВСКИЙ, Н. В. ДЬЯЧЕНКО,
Ю. Б. РЖОНСНИЦКАЯ, Н. А. САНОЦКАЯ, А. Л. СКОБЛИКОВА, Т. Ю. ЯКОВЛЕВА

*Российский государственный гидрометеорологический университет,
192007, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: potapovaira@yandex.ru*

Представлены разработанные модели, описывающие процесс экспериментальных исследований экстремально слабого рассеяния света частицей атмосферного аэрозоля. Такое рассеяние обусловлено тем, что размеру частицы соответствует толщина слоя покрытия. Для разработки моделей использованы данные эксперимента, выполненного одновременно оптическим счетчиком и фильтровым аспирационным устройством. Рассмотрены теоретические основы моделирования процесса рассеяния света частицей атмосферного аэрозоля с показателем преломления, радиально изменяющимся в слое покрытия. Модель базируется на данных натуральных экспериментов, причем возможно решение как разрывных, так и непрерывных задач моделирования процесса рассеяния электромагнитных волн для неоднородных облучаемых структур. Модель считается адекватно описывающей экспериментальные данные, если расхождение между ними и результатами модельных расчетов не превышает погрешности эксперимента. С использованием уникальных экспериментальных данных предложены новые модели неоднородной частицы аэрозоля, адекватно описывающие процесс экстремально слабого направленного рассеяния излучения.

Ключевые слова: модель, атмосферный аэрозоль, рассеяние света, оптический счетчик, размер частицы, погрешность определения, аспирационное устройство

Введение. Для измерения характеристик аэрозоля используются оптические счетчики частиц, лидары и другие приборы. Оптическими счетчиками частиц определяется дисперсный состав аэрозоля, лидарами — его пространственное распределение в атмосфере. Несмотря на оперативность измерений оптическими методами [1], они имеют существенный недостаток — зависимость получаемых результатов от микрофизических свойств аэрозольных частиц [2, 3]. Эти методы не позволяют непосредственно определить микрофизические характеристики атмосферы [4]. В частности, размеры аэрозольных частиц определяются по измерениям параметров направленного рассеяния излучения. Параметры рассеяния зависят как от размеров частиц, так и от их свойств. Зависимость полученных результатов от микрофизических свойств частиц атмосферного аэрозоля, как показывают данные эксперимента, может быть чрезвычайно существенной [5—10]. Это обстоятельство должно быть учтено при разработке оптических методов.

Решению рассматриваемой проблемы посвящено множество публикаций. Так, в монографиях [11, 12] подробно рассмотрены вопросы рассеяния излучения на однородных и неоднородных частицах. Особенности, отмеченные выше, усложняют проблему интерпретации результатов измерений микрофизических характеристик, измеряемых оптическими счетчиками частиц, прежде всего, в условиях экстремально слабого рассеяния излучения [13].

Настоящая статья посвящена проблеме интерпретации аэрозольной информации, включающей результаты экспериментального исследования рассеяния излучения оптическими методами [1—5, 14—17], и направлена на совершенствование этих методов на основе моделирования процесса рассеяния света.

Теоретические основы моделирования процессов рассеяния и ослабления излучения неоднородной частицей. Моделирование процесса рассеяния света частицами атмосферного аэрозоля предполагает решение системы уравнений Максвелла относительно векторов напряженности электрического и магнитного полей на основе результатов натуральных измерений [13].

Для анализа экспериментальных результатов выбрана модель [18, 19] частицы с радиально изменяющимся показателем преломления в слое покрытия — оболочке, покрывающей однородное ядро.

Как правило, методы решения уравнений Максвелла основываются на использовании специальных функций. Это ограничивает область их применения случаями разрывных неоднородных облучаемых структур. Для расширения области применения предлагается решение системы уравнений Максвелла для общего случая радиального распределения комплексного показателя преломления, в том числе непрерывного распределения [20]. Уравнения Гельмгольца, которыми описываются потенциалы Дебая D , B , решаются методом разделения переменных в виде разложения в ряд.

При этом для функций радиальной переменной получаются дифференциальные уравнения второго порядка, дающие численное решение для неоднородного слоя покрытия. На поверхностях раздела ядро — слой, слой — среда задаются граничные условия, которые следуют из непрерывности тангенциальных составляющих векторов напряженностей полей. Заданные граничные условия предусматривают возможность решения задач моделирования процесса рассеяния электромагнитных волн для неоднородных облучаемых структур.

В статье рассматриваются особенности рассеяния света частицами аэрозоля; учет этих особенностей позволит повысить достоверность результатов определения аэрозольных характеристик за счет уменьшения их зависимости от рассеивающих свойств частиц. Эта задача особенно сложна в условиях загрязнения атмосферы крупными промышленными центрами различными фракциями частиц аэрозоля [21]. Кроме имеющихся различных аэрозольных фракций, задача определения оптико-микроструктурных связей аэрозольных частиц осложняется значительной изменчивостью характеристик рассеяния света частицами.

Рассмотрим квазистационарный случай рассеяния частицей света с круговой частотой $\omega = kc$ и напряженностями электрического $E \exp(i\omega t)$ и магнитного $H \exp(i\omega t)$ полей, в результате находим решение системы уравнений

$$\operatorname{rot} H = ikm^2 E, \quad \operatorname{rot} E = -ikH, \quad (1)$$

где k — волновое число, c — скорость света, m — комплексный показатель преломления частицы.

Для анализа результатов натуральных измерений рассмотрим модель неоднородной частицы с радиально изменяющимся показателем преломления в оболочке, покрывающей однородное ядро. В этой модели r_0 — радиус ядра частицы, r_1 — радиус частицы, r — расстояние от центра, $\rho = kr$ — волновое расстояние, $\rho_0 = kr_0$ — приведенный радиус ядра

частицы, $\rho_1 = kr_1$ — приведенный радиус частицы, m_0 — показатель преломления ядра, m_1 — показатель преломления атмосферы.

Показатель преломления $m(\rho)$ частицы задается функцией от ρ . Уравнения (1) записываются в сферической системе координат ρ, θ, φ .

С потенциалами Дебая компоненты напряженностей полей связаны известными соотношениями [12]. Эти потенциалы выражаются через присоединенную функцию Лежандра $P_j I(\cos\theta)$ и функции $D_j(\rho), B_j(\rho)$, которые удовлетворяют дифференциальным уравнениям [5].

Для решения рассматриваемых уравнений, описывающих функции $D_j(\rho), B_j(\rho)$, их можно преобразовать введением функций $Y_j(\rho_1), Z_j(\rho_1)$, которые выражаются через логарифмические производные от $D_j(\rho), B_j(\rho)$ в дифференциальные уравнения Риккати. Функции $Y_j(\rho_1), Z_j(\rho_1)$ определяются путем численного решения дифференциальных уравнений Риккати с известными начальными условиями, учитывающими, что показатель преломления ядра может не совпадать с его значением на нижней границе слоя покрытия.

Для исследования коэффициента направленного рассеяния вводится величина $(i_1 + i_2)$, где

$$i_1 = \left| \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2j+1}{j(j+1)} (a_j S_j + b_j Q_j) \right|^2; \quad (2)$$

$$i_2 = \left| \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2j+1}{j(j+1)} (a_j Q_j + b_j S_j) \right|^2, \quad (3)$$

здесь S_j, Q_j — угловые функции [11], связанные с присоединенными функциями Лежандра; a_j, b_j — коэффициенты поля в рассеянной волне.

В ходе исследования найдены численные решения дифференциальных уравнений, что позволяет рассмотреть достаточно общий случай моделирования рассеяния света аэрозольными частицами с неоднородным слоем покрытия.

Следует отметить, что в процессе исследования использованы относительные величины.

Таким образом, рассмотрены теоретические основы моделирования процесса рассеяния света частицей атмосферного аэрозоля с показателем преломления, радиально изменяющимся в слое покрытия. Модель базируется на данных, полученных в результате натурных экспериментов, причем имеется возможность решения как разрывных, так и непрерывных задач моделирования процесса рассеяния электромагнитных волн для неоднородных облучаемых структур.

Интегрирование рассматриваемых уравнений выполняется методом Рунге — Кутты третьего порядка и методом Эйлера. Результаты сравнения двух методов решения уравнения Риккати для линейного распределения показателя преломления в слое покрытия незначительно различаются.

Экстремально слабое рассеяние аэрозольной частицей. Результаты измерений размеров частиц оптическим счетчиком зависят от рассеивающих свойств частиц. В одних условиях это обстоятельство не сказывается заметно на результатах измерений, в других условиях размеры частиц, определенные оптическим счетчиком, далеки от реальных.

В табл. 1, 2 представлены результаты определения аэрозольных характеристик [16] в ходе эксперимента, проведенного в пос. Воейково (Санкт-Петербург), когда спектры размеров частиц измерялись оптическим счетчиком АЗ-5 и путем отбора проб на фильтр аспирационным устройством (АУ). В таблицах $N = N(D)$ — интегральная счетная концентрация частиц, т.е. суммарное число частиц N , дм^{-3} , размер которых превышает D , мкм.

Таблица 1

$\ln D$	$\ln N(\text{АЗ-5})$	$\ln N(\text{АУ})$	$\ln D$	$\ln N(\text{АЗ-5})$	$\ln N(\text{АУ})$
-0,9	8,2	—	0,80	—	6,9
-0,6	7,2	—	1,20	3,8	6,1
-0,5	6,75	—	1,60	—	5,2
-0,4	6,3	—	1,85	2,2	5
-0,3	6,1	—	2,00	—	4,8
-0,2	5,9	—	2,20	1	3,8
0,00	5,8	7,5	2,40	—	3,6
0,25	5,55	—	2,60	—	2,8
0,60	5,45	—	3,00	—	2,2

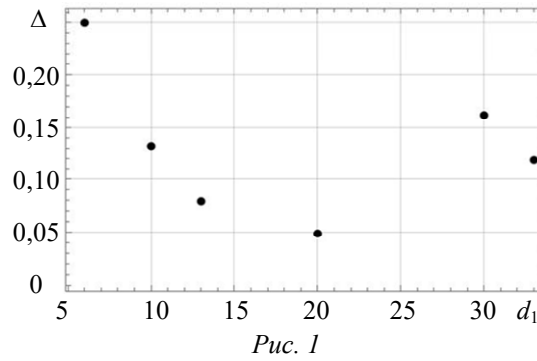
Таблица 2

$\ln D$	$\ln N(\text{АЗ-5})$	$\ln N(\text{АУ})$	$\ln D$	$\ln N(\text{АЗ-5})$	$\ln N(\text{АУ})$
-0,9	11,8	—	0,85	6,7	7,5
-0,6	11,0	—	1,50	5,0	6,4
-0,4	9,6	—	1,85	4,4	5,5
-0,2	9,4	—	2,00	—	4,2
-0,1	8,8	—	2,35	3,0	3,3
0,00	8,35	8,3	2,50	—	2,8
0,40	7,0	—	3,00	1,1	1,0

Анализ результатов, представленных в табл. 1, 2, показывает, что данные двух приборов удовлетворительно согласуются в условиях наличия сравнительно плотной дымки (см. табл. 2), когда коэффициент ослабления $\sigma=0,6 \text{ км}^{-1}$. При более прозрачной атмосфере, когда $\sigma=0,1 \text{ км}^{-1}$ (см. табл. 1), аспирационным устройством зарегистрированы частицы, значительно более крупные по сравнению с частицами, зарегистрированными счетчиком АЗ-5. Расхождения количества частиц по данным двух приборов в логарифмическом масштабе достигают значительных величин, что связано с погрешностью определения размера частиц. При интерпретации полученных результатов следует учесть, что оптический счетчик градуируется, например, латэксными шариками. Таким образом, в условиях менее прозрачной атмосферы оптические свойства градуировочных частиц соответствуют оптическим свойствам натуральных частиц, при более прозрачной атмосфере такого соответствия нет.

Для оценки погрешности определения размера частиц следует рассмотреть размеры частиц, измеренных приборами АЗ-5 и АУ, при одинаковых величинах N , как, например, отмеченные в табл. 1 жирным шрифтом. Расхождение размеров частиц по данным двух приборов в логарифмическом масштабе может превысить единицу, т.е. погрешность определения размера частицы модели может достигать 300 %.

Результаты определения отношения и квадрата отношений размеров $(D(\text{АЗ-5})/D)^2=\Delta$, измеренных двумя приборами (рис. 1), характеризуют различие индикатрис рассеяния излучения натурными частицами и частицами, используемыми для градуировки счетчика АЗ-5; на рисунке по оси абсцисс $d_1 = 2\rho_1$ — приведенный размер частицы.



Для описания факта расхождения размеров частиц, измеренных приборами АЗ-5 и АУ, рассматривается оптическая модель, основанная на данных эксперимента в пос. Воейково.

Результаты оптических измерений, соответствующие эксперименту. Расчеты выполнены для распределения показателя преломления в слое покрытия, представленного в табл. 3 как характеристики рассеивающего центра частицы

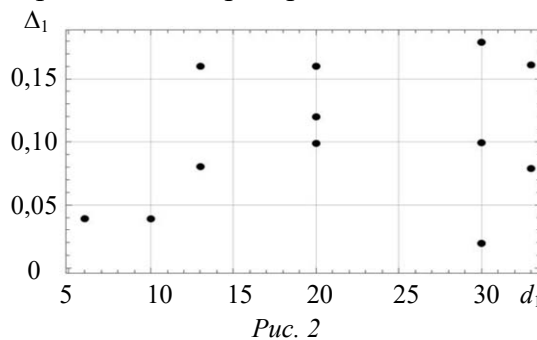
$$d = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_1 - \rho_0},$$

где ρ — волновое расстояние, равное $\rho = \pi D / \lambda$, где λ — длина волны излучения, используемого в счетчике.

Таблица 3

Распределение показателя преломления	$m(\rho)$	Частица
Гиперболическое	$(0,98 - 1,28i) / (1 + d) + 0,84 + 0,64i$	Обводненная
Гиперболическое	$(1,64 - 1,28i) / (1 + d) + 0,18 + 0,64i$	Необводненная
Линейное	$m_0 - (0,49 - 0,64i) d$	Обводненная
Линейное	$m_0 - (0,82 - 0,64i) d$	Необводненная

На рис. 2 представлены результаты определения толщины оболочки обводнения слоя, характеризуемого отношением $(\rho_1 - \rho_0) / \rho_0 = \Delta_1$, по данным эксперимента для модели необводненной частицы с гиперболическим распределением показателя преломления.



На рис. 3 приведены графики, демонстрирующие отношение индикатрис рассеяния:

$$IR(1) / IR(1,33) = I_1,$$

где $IR(1)$ — интенсивность рассеянного света в воздухе, $IR(1,33)$ — интенсивность рассеянного света в воде.

Рассматриваются отношения индикатрис рассеяния под углом 90° необводненных частиц к индикатрисам обводненных частиц при $\rho_0 = 10$ и $\rho = 30$ (рис. 3, а, б соответственно). Модельные расчеты (кривая 1) наиболее близки к натурным измерениям (кривая 2) при толщине обводненного слоя $\Delta_1 \approx 15$ (рис. 3, а) и $\Delta_1 = 3 \div 5$ (рис. 3, б).

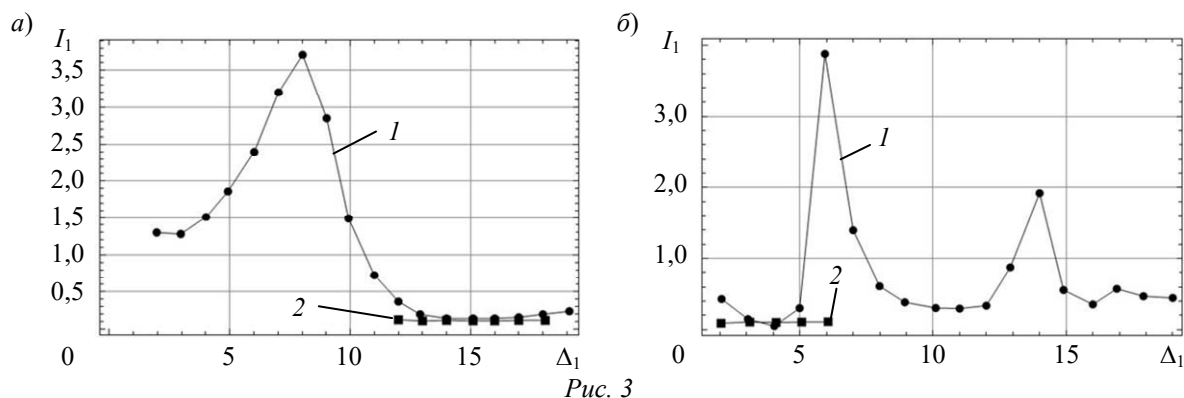


Рис. 3

Заключение. Установлено, что при оптических измерениях погрешность определения размера частицы атмосферного аэрозоля за счет использования неадекватно описывающей процесс рассеяния модели может достигать 300 %. С использованием экспериментальных данных разработаны модели неоднородной частицы аэрозоля, отличающиеся тем, что размеру частицы ставится в соответствие толщина слоя покрытия. Показано, что разработанные модели адекватно описывают процесс направленного рассеяния излучения частицей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляева С. П., Никифорова Н. К., Смирнов В. В., Щелчков Г. И. Оптико-электронные методы изучения аэрозолей. М.: Энергоиздат, 1981. С. 232.
2. Егоров А. Д., Потапова И. А., Щукин Г. Г. Методы лидарного зондирования атмосферного аэрозоля // Оптический журнал. 2001. Т. 68, № 11. С. 10—14.
3. Yegorov A. D., Kopp I. Z., Perelman A. Y. Air aerosol pollution and lidar measurements // Progress in Biomedical Optics and Imaging. 1995. Vol. 2505. P. 38.
4. Егоров А. Д., Потапова И. А., Ржонсницкая Ю. Б. Обращение лидарных сигналов малой мощности // Оптич. журн. 2007. Т. 74, № 10. С. 25—28.
5. Егоров А. Д., Потапова И. А., Ржонсницкая Ю. Б., Саноцкая Н. А. Определение оптических и микроструктурных характеристик атмосферного аэрозоля // Ученые записки РГГМУ. 2009. № 11. С. 71—78.
6. Пат. 2560142 С1 РФ. Способ аспирационной оптической спектрометрии дисперсной среды / А. Д. Егоров, И. А. Потапова, В. А. Драбенко. 20.08.2015.
7. Егоров А. Д., Потапова И. А. Лидарные исследования прозрачности атмосферы // Тр. Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2004. № 553. С. 131—142.
8. Егоров А. Д., Потапова И. А., Ржонсницкая Ю. Б., Ощуркова А. А. Методы лидарного зондирования аэрозольных загрязнений атмосферы импульсами конечной длительности // Ученые записки РГГМУ. 2011. № 18. С. 48—56.
9. Пат. 2607050 С1 РФ. Способ определения дисперсного состава аэрозоля / А. Д. Егоров, В. М. Абрамов, И. А. Потапова, Н. А. Саноцкая. 10.01.2017.
10. Егоров А. Д., Ивлев Л. С., Потапова И. А., Ржонсницкая Ю. Б., Саноцкая Н. А., Драбенко Д. В. Измерение характеристик атмосферного аэрозоля и проблема достоверности // Естественные и антропогенные аэрозоли: Сб. докл. XI Междунар. конф., Санкт-Петербург, 16—18 окт. 2018 г. СПб: Астерион, 2018. С. 47—52.
11. Шифрин К. С. Рассеяние света в мутной среде. М.—Л.: Гостехтеориздат, 1951. 264 с.
12. Kerker M. The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation. N. Y.: Academic Press, 1969. 666 p.
13. Егоров А. Д., Ионин В. А. Вопросы параметризации оптико- микроструктурных связей аэрозольных частиц // Тр. Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 1981. Вып. 448. С. 70—75.
14. Егоров А. Д., Потапова И. А. Определение характеристик аэрозоля лидарными системами // Тр. Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2003. № 552. С. 14—18.

15. Egorov A. D., Potapova I. A., Shchukin G. G. Lidar methods for probing an atmospheric aerosol // J. of Optical Technology. 2001. Vol. 68, N 11. С. 801—804.
16. Пат. 2017139 С1 РФ. Способ определения концентраций газовых компонентов слоя атмосферы / А. Д. Егоров, И. А. Егорова. 30.07.1994.
17. Пат. 2439626 С2 РФ. Способ определения прозрачности атмосферы / А. Д. Егоров, И. А. Потапова. 10.01.2012.
18. Yegorov A. D., Potapova I. A., Rzhonsnitskaya Yu. B. Atmospheric aerosols measurements and reliability problem // Intern. Journal of Remote Sensing. 2008. Vol. 29. P. 2449—2468.
19. Yegorov A. D., Potapova I. A., Rzhonsnitskaya Yu. B., Drabenko V. A., Sanotskaya N. A., Shchadin A. V. Atmospheric aerosols measurements and reliability problem: new results // Intern. Journal of Remote Sensing. 2014. Vol. 35. P. 5750—5765.
20. Егоров А. Д., Потапова И. А., Ржонсницкая Ю. Б., Саноцкая Н. А. Моделирование характеристик рассеяния излучения частицами атмосферного аэрозоля // Ученые записки РГГМУ. 2013. № 27. С. 71—76.
21. Willeke K., Whitby K. T. Atmospheric aerosols: size distribution interpretation // J. Air Poll. Control Assoc. 1975. Vol. 25, N 5. P. 529—534.

Сведения об авторах

- | | |
|---------------------------------------|---|
| Ирина Александровна Потапова | — д-р физ.-мат. наук, профессор; РГГМУ;
E-mail: potapovaira@yandex.ru |
| Анатолий Петрович Бобровский | — канд. физ.-мат. наук, доцент; РГГМУ; заведующий кафедрой;
E-mail: kafedra_phys@rshu.ru |
| Наталья Владимировна Дьяченко | — д-р техн. наук, профессор; РГГМУ; E-mail: nat230209@yandex.ru |
| Юлия Борисовна Ржонсницкая | — д-р физ.-мат. наук, доцент; РГГМУ; E-mail: july.rzhony@gmail.com |
| Надежда Александровна Саноцкая | — канд. физ.-мат. наук, доцент; РГГМУ; E-mail: na_san@mail.ru |
| Анна Львовна Скобликова | — канд. физ.-мат. наук, доцент; РГГМУ; E-mail: kafedra_phys@rshu.ru |
| Татьяна Юрьевна Яковлева | — канд. физ.-мат. наук, доцент; РГГМУ; E-mail: yakovtat@yandex.ru |

Поступила в редакцию
23.01.2021 г.

Ссылка для цитирования: Потапова И. А., Бобровский А. П., Дьяченко Н. В., Ржонсницкая Ю. Б., Саноцкая Н. А., Скобликова А. Л., Яковлева Т. Ю. Модель процесса экстремального рассеяния света частицей атмосферного аэрозоля // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 5. С. 376—383.

MODEL OF THE PROCESS OF EXTREME LIGHT SCATTERING BY ATMOSPHERIC AEROSOL PARTICLE

**I. A. Potapova, A. P. Bobrovsky, N. V. Dyachenko,
Yu. B. Rzhonsnitskaya, N. A. Sanotskaya, A. L. Skoblikova, T. Yu. Yakovleva**

*Russian State Hydrometeorological University,
192007, St. Petersburg, Russia
E-mail: potapovaira@yandex.ru*

Models developed to describe the experimentally observed phenomenon of extremely weak light scattering by an atmospheric aerosol particle are presented. This scattering phenomenon is due to the particle size being matched to the thickness of the coating layer. For the model development, experimental data obtained with simultaneous use of an optical counter and a filter aspiration device were used. Theoretical foundations of modeling the process of light scattering by a particle of atmospheric aerosol with refractive index radially changing in the coating layer are considered. The model is based on data from field experiments and may be used to solve both discontinuous and continuous problems of the process of electromagnetic waves scattering by inhomogeneous irradiated structures. The model is considered to adequately describe the experimental data since the discrepancy between them and results of model calculations does not exceed the experimental error. Using unique experimental data, new models of an inhomogeneous aerosol particle are proposed, which adequately describe the process of extremely weak directional scattering of radiation.

Keywords: model, atmospheric aerosol, light scattering, optical counter, particle size, determination error, aspiration device

REFERENCES

1. Belyaeva S.P., Nikiforova N.K., Smirnov V.V., Shchelchikov G.I. *Optiko-elektronnyye metody izucheniya aerorozley* (Optoelectronic Methods for Studying Aerosols), Moscow, 1981, 232 p. (in Russ.)
2. Egorov A.D., Potapova I.A., Shchukin G.G. *Journal of Optical Technology*, 2001, no. 11(68), pp. 10–14.
3. Yegorov A.D., Kopp I.Z., Perelman A.Y. *Progress in Biomedical Optics and Imaging*, 1995, vol. 2505, pp. 38.
4. Egorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B. *Journal of Optical Technology*, 2007, no. 10(74), pp. 25–28.
5. Egorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B., Sanotskaya N.A. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2009, no. 11, pp. 71–78. (in Russ.)
6. Patent RU 2560142 C1, *Sposob aspiratsionnoy opticheskoy spektrometrii dispersnoy sredy* (Method for Aspiration Optical Spectrometry of a Dispersed Medium), Egorov A.D., Potapova I.A., Drabenko V.A., Patent application no. 2014115935/28, Priority 21.04.2014, Published 20.08.2015. (in Russ.)
7. Egorov A.D., Potapova I.A. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voyeykova*, 2004, no. 553, pp. 131–142. (in Russ.)
8. Egorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B., Oshurkova A.A. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2011, no. 18, pp. 48–56. (in Russ.)
9. Patent RU 2607050 C1, *Sposob opredeleniya dispersnogo sostava aerorozlya* (Method for Determining the Dispersed Composition of Aerosol), Egorov A.D., Abramov V.M., Potapova I.A., Sanotskaya N.A., Patent application no. 2015132868, Priority 06.08.2015, Published 10.01.2017. (in Russ.)
10. Egorov A.D., Ivlev L.S., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B., Sanotskaya N.A., Drabenko D.V. *Estestvennyye i antropogennyye aerorozli* (Natural and anthropogenic aerosols), Collection of reports, 2018, pp. 47–52. (in Russ.)
11. Shifrin K.S. *Rasseyaniye sveta v mutnoy srede* (Scattering of Light in a Turbid Environment), Moscow, Leningrad, 1951, 264 p. (in Russ.)
12. Kerker M. *The Scattering of light and other electromagnetic radiation*, NY, Academic Press, 1969, 666 p.
13. Egorov A.D., Ionin V.A. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voyeykova*, 1981, no. 448, pp. 70–75. (in Russ.)
14. Egorov A.D., Potapova I.A. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voyeykova*, 2003, no. 552, pp. 14–18. (in Russ.)
15. Egorov A.D., Potapova I.A., Shchukin G.G. *Journal of Optical Technology*, 2001. T. 68. № 11. C. 801-804.
16. Patent RU 2017139 C1, *Sposob opredeleniya kontsentratsiy gazovykh komponentov sloya atmosfery* (Method for Determining the Concentration of Gaseous Components of the Atmospheric Layer), Egorov A.D., Egorova I.A., Patent application no. 4918909/25, Priority 27.03.1991, Published 30.07.1994. (in Russ.)
17. Patent RU 2439626 C2, *Sposob opredeleniya prozrachnosti atmosfery* (Method for Determining the Transparency of the Atmosphere), Egorov A.D., Potapova I.A., Patent application no. 2009144060/28, Priority 27.11.2009, Published 10.01.2012. (in Russ.)
18. Yegorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, vol. 29, pp. 2449–2468.
19. Yegorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B., Drabenko V.A., Sanotskaya N.A., Shchadin A.V. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, vol. 35, pp. 5750–5765.
20. Egorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B., Sanotskaya N.A. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2013, no. 27, pp. 71–76.
21. Willeke K., Whitby K.T. *Air Poll. Control Assoc.*, 1975, no. 5(25), pp. 529–534.

Data on authors

Irina A. Potapova	— Dr. Sci., Professor; Russian State Hydrometeorological University; E-mail: potapovaira@yandex.ru
Anatoly P. Bobrovsky	— PhD, Associate Professor; Russian State Hydrometeorological University; Head of Department; E-mail: kafedra_phys@rshu.ru
Natalia A. Dyachenko	— Dr. Sci., Professor; Russian State Hydrometeorological University; E-mail: nat230209@yandex.ru
Yulia B. Rzhonsnitskaya	— Dr. Sci., Associate Professor; Russian State Hydrometeorological University; E-mail: july.rzhony@gmail.com
Nadezhda A. Sanotskaya	— PhD, Associate Professor; Russian State Hydrometeorological University; E-mail: na_san@mail.ru
Anna L. Skoblikova	— PhD, Associate Professor; Russian State Hydrometeorological University; E-mail: kafedra_phys@rshu.ru
Tatiana Yu. Yakovleva	— PhD, Associate Professor; Russian State Hydrometeorological University; E-mail: yakovtat@yandex.ru

For citation: Potapova I. A., Bobrovsky A. P., Dyachenko N. V., Rzhonsnitskaya Yu. B., Sanotskaya N. A., Skoblikova A. L., Yakovleva T. Yu. Model of the process of extreme light scattering by atmospheric aerosol particle. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 5. P. 376–383 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-5-376-383