

С.А. Береснев, Л.Б. Кочнева, П.Е. Суетин

Расчет и анализ микрофизических оптических характеристик атмосферного аэрозоля: модель однородных сферических частиц

Уральский государственный университет, г. Екатеринбург

Поступила в редакцию 27.11.2001 г.

Представлены результаты расчетов на основе теории Лоренца–Ми микрофизических оптических характеристик (интенсивности внутреннего поля, факторов эффективности поглощения, асимметрии поглощения излучения, светового давления) для некоторых характерных типов атмосферного аэрозоля. Для упрощения анализа рассматривается модель оптически однородных сферических частиц. Полученные результаты позволяют установить общие закономерности в поведении указанных характеристик для сильно-, умеренно- и слабопоглощающих частиц. Особое внимание уделяется анализу фактора асимметрии поглощения J_1 . Обнаружены характерные особенности J_1 для определенных типов атмосферного аэрозоля. В частности, для частиц с $n = 1,5 \div 3,0$ и $k = 0,01 \div 0,1$ наблюдается возможность как отрицательного ($J_1 > 0$), так и положительного ($J_1 < 0$) фотофореза. Полученные результаты планируется использовать для разработки модели вертикального переноса стратосферного аэрозоля.

Введение

Среди микрофизических оптических характеристик (МОХ), ответственных за динамику частиц в поле направленного электромагнитного излучения, возможно выделить минимально необходимый комплекс величин [1]: функцию источников электромагнитной энергии в объеме частицы $B(\mathbf{r})$ (или связанную с ней интенсивность внутреннего поля $I(r)$); фактор эффективности поглощения излучения Q_{abs} ; фактор эффективности светового давления Q_{pr} ; фактор асимметрии поглощения излучения J_1 , ответственный за фотофоретическое движение частиц. Все они, включая отчасти и фактор Q_{pr} , связаны с не рассеянным, а с поглощенным частицей излучением. Отметим, что необходимость анализа комплекса, а не отдельных оптических характеристик частиц, отмечалась и ранее [2, 3]. Такой подход позволяет выявить общие закономерности зависимостей характеристик от определяющих параметров для частиц различных типов.

Если такие характеристики, как $B(\mathbf{r})$ и Q_{abs} , достаточно хорошо исследованы не только для оптически однородных, но и для многослойных сферических частиц (например, [4, 5]), то систематического исследования фактора J_1 до последнего времени не проводилось. Немногочисленная информация и о свойствах фактора Q_{pr} , что является важным для оценки степени конкуренции сил светового давления и фотофоретических сил. В этой связи кажется оправданным использование в работе модели оптически однородных сферических частиц для расчета полного комплекса МОХ. В результате появляется возможность с еди-

ных позиций проанализировать поглощающие свойства (и их следствия) для частиц основных типов атмосферного аэрозоля, что и являлось основной целью данной работы.

Методы и алгоритмы расчета микрофизических оптических характеристик

Величины $I(r)$, Q_{abs} , Q_{pr} и J_1 рассчитывались в зависимости от значений дифракционного параметра $\rho = 2\pi R_0/\lambda$ по теории Лоренца–Ми [6] для частиц различных типов атмосферного аэрозоля с достоверно известными значениями комплексного показателя преломления $m(\lambda) = n + ik$ для длин волн падающего излучения 0,5 и 10,6 мкм. Для расчета указанных МОХ известен ряд хорошо апробированных и эффективных алгоритмов (например, [6, 7]). Они позволяют вычислять характеристики, связанные как с поглощенным, так и с рассеянным излучением. В частности, модификация Дрэйна известного алгоритма Борена–Хафмена [6] позволяет рассчитать величины Q_{abs} и Q_{pr} с требуемой точностью в достаточно широком диапазоне изменения дифракционного параметра (вплоть до $\rho \geq 200$). Также были использованы фор-трановские программы S1 и S7 из монографии Барбера и Хилла [7], по которым возможно проводить расчеты величин $I(r)$, Q_{abs} и Q_{pr} вплоть до $\rho = 200$ и $|m| \geq 1,5$. Для расчета фактора J_1 использовался модифицированный алгоритм Борена–Хафмена [6], учитывающий результаты работы [8] и реализованный в пакете Mathematica 3.0.

Характерные типы атмосферного аэрозоля и их оптические постоянные

В настоящей работе анализировались поглощающие свойства однородных частиц атмосферного аэрозоля, состоящих преимущественно из одного химического соединения, и так называемых модельных частиц, свойства которых будут описаны ниже. Известно большое количество работ по определению оптических констант воды и льда и их температурной зависимости в широкой области спектра излучения (см., например, [9]). Поэтому ниже представлены результаты расчетов для капель чистой воды, морской воды средней солености и сферических частиц аморфного льда. Весьма распространенными химическими компонентами частиц являются силикаты, среди которых наиболее изученным является аморфный кварц. Известно [9], что для расчета оптических характеристик SiO_2 , присутствующего в аэрозолях, наиболее пригодны значения n и k халцедона. Существенное влияние на комплексный показатель преломления вещества атмосферных аэрозолей оказывает присутствие в них окислов железа и алюминия [9].

В данной работе, в частности, анализировались поглощающие свойства частиц гематита (Fe_2O_3) и корунда (Al_2O_3). Сера является одним из немногих химических элементов, которые могут существовать в природе в свободном состоянии. Наиболее важной компонентой мелкодисперсной фракции атмосферных аэрозолей являются сульфаты. Водные растворы серной кислоты и сульфата аммония – типичные компоненты аэрозолей вулканического и антропогенного происхождения [10]. По этой причине были проанализированы свойства капель растворов серной кислоты (H_2SO_4) и частиц сульфата аммония ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$). Сажа природного и антропогенного происхождения также является важным компонентом тропосферного и стратосферного аэрозолей. Роль сажи чрезвычайно велика в поглощении солнечного излучения земной атмосферой. Первичные частицы сажи, образующиеся в процессах термической деструкции и горения углеродсодержащих веществ, возможно считать сферическими. В таблице приведены данные об оптических постоянных отобранных для анализа частиц для двух длин волн – $\lambda = 0,5$ мкм (максимум интенсивности в спектре солнечного излучения в атмосфере) и $\lambda = 10,6$ мкм (излучение газоразрядного CO_2 -лазера).

Очевидно, что указанный выбор частиц для последующего анализа их оптических характеристик является достаточно произвольным и всегда ограниченным. Поэтому в рамках проблемы моделирования оптических характеристик атмосферных аэрозолей (прямая задача оптики аэродисперсных систем) необходимо задаваться вопросом и о моделировании оптических постоянных частиц. Данная задача актуальна при разработке аэрозольных моделей атмосферы и подробно рассмотрена в [9, 10, 12]. При расчетах использовался прием, основанный на рекомендациях и выводах монографии [9]: для так называемых модельных

Оптические постоянные частиц в расчетах МОХ

Вещество частицы	$\lambda = 0,5$ мкм		$\lambda = 10,6$ мкм		Источник
	n	k	n	k	
Чистая вода	1,334	$1,32 \cdot 10^{-9}$	1,144	0,0671	[10]
Морская вода средней солености	1,342	$2,4 \cdot 10^{-10}$	1,189	0,082	[11]
Лед	1,312	$1,0 \cdot 10^{-4}$	1,153	0,124	[10]
Аморфный кварц (SiO_2)	1,535	$5 \cdot 10^{-4}$	1,51	0,0496	[10]
Гематит (Fe_2O_3)	3,025	0,0154	1,70	0,259	[10]
Корунд (Al_2O_3)	1,78	$5,0 \cdot 10^{-4}$	0,58	$5,0 \cdot 10^{-4}$	[11]
50%-й раствор серной кислоты (H_2SO_4)	–	–	1,535	0,192	[11]
Сульфат аммония ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)	1,52	$5,0 \cdot 10^{-4}$	1,98	$2,0 \cdot 10^{-3}$	[10]
Сажа	1,82	0,74	2,42	1,02	[10]

частиц задавались значения n и k из некоторого возможного диапазона, не нарушающего соотношений Крамерса–Кронига. Конкретно в работе рассматривались модельные частицы с широкими интервалами $n = 1,0 \div 3,0$ и $k = 10^{-5} \div 5,0$. Такой диапазон оптических постоянных позволяет, по-видимому, промоделировать в расчетах поглощающие свойства всех основных типов атмосферного аэрозоля.

Обсуждение результатов

1. Интенсивность внутреннего поля

Из литературы известны два способа представления плотности электромагнитной энергии в объеме частицы. Первый – расчет локальной функции источников $B(\mathbf{r})$ (например, [8, 13, 14]), второй – расчет усредненной по углам интенсивности внутреннего поля $I(r)$ [7]. Для неполяризованного монохроматического излучения с учетом осевой симметрии задачи функция источников $B(\mathbf{r})$ может быть представлена в виде [13]:

$$B(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{|E(r, \theta, \varphi)|^2}{E_0^2} d\varphi = B\left(r, \theta, \frac{\pi}{4}\right), \quad (1)$$

где $E(r, \theta, \varphi)$ – локальная напряженность электрического поля внутри частицы; E_0 – амплитуда напряженности в падающей волне; θ и φ – полярный и азимутальный углы в сферической системе координат с началом в центре частицы. Усредненная по углам интенсивность внутреннего поля $I(r)$ может быть записана следующим образом [7]:

$$I(r) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} (EE^*) \sin \theta d\theta d\varphi = \frac{E_0^2}{2} \int_0^{\pi} B(r, \theta, \varphi) \sin \theta d\theta. \quad (2)$$

Оба способа дают наглядное представление о распределении электромагнитной энергии внутри частицы.

В данной работе авторы использовали вариант представления [7].

Как видно из рис. 1, в зависимости от значений $m(\lambda)$ при фиксированной длине волны можно выделить три характерные группы частиц: слабо, умеренно и сильно поглощающие излучение частицы. На рис. 1, *a* представлены результаты для частицы аморфного кварца при $\lambda = 0,5$ мкм и $\rho = 100$. Характерно преобладание поглощения на тыльной стороне частицы (результат фокусирующего действия сферы). При $\rho = 100$ интенсивность внутреннего поля может превышать интенсивность падающего излучения более чем в 140 раз. Аналогичные зависимости можно видеть для капель чистой воды и морской воды средней солености, частиц льда и сульфата аммония. Все это закономерно позволяет отнести их к группе слабопоглощающих частиц. Однако при $\lambda = 10,6$ мкм и достаточно больших ρ (рис. 1, *б*) для тех же самых частиц наблюдается преобладание поглощения во фронтальной области, что характерно для сильнопоглощающих частиц. Очевидно, что деление частиц на характерные группы в зависимости от их поглощающих свойств должно учитывать не только химический состав аэрозолей, но и характеристики падающего излучения.

Интересные особенности внутреннего поглощения демонстрируют частицы корунда. При $\lambda = 0,5$ мкм ($m = 1,78 + 5 \cdot 10^{-4}i$) при больших ρ они являются достаточно типичными представителями слабопоглощающих частиц. При $\lambda = 10,6$ мкм ($m = 0,58 + 5 \cdot 10^{-4}i$) и также при больших ρ максимумы распределения внутренней интенсивности расположены не на главном диаметре частицы (как при $\lambda = 0,5$ мкм), а сосредоточены в кольцевой зоне фронтальной области частицы. Данный факт полностью согласуется с результатами [15].

Умеренно поглощающие частицы (например, гематит, рис. 1, *в*) демонстрируют следующие особенности внутреннего поля: при больших ρ они очень эффективно фокусируют излучение в ограниченной области посередине тыльной части частицы, причем интенсивность внутреннего поля может превышать интенсивность падающего в десятки раз.

Типичными представителями сильно поглощающих аэрозолей являются частицы сажи. Для них характерно интенсивное поглощение в тонком поверхностном фронтальном слое (рис. 1, *е*). Однако это свойственно только крупным частицам сажи, рэлеевские частицы демонстрируют практически однородное по объему поглощение излучения, что свойственно частицам

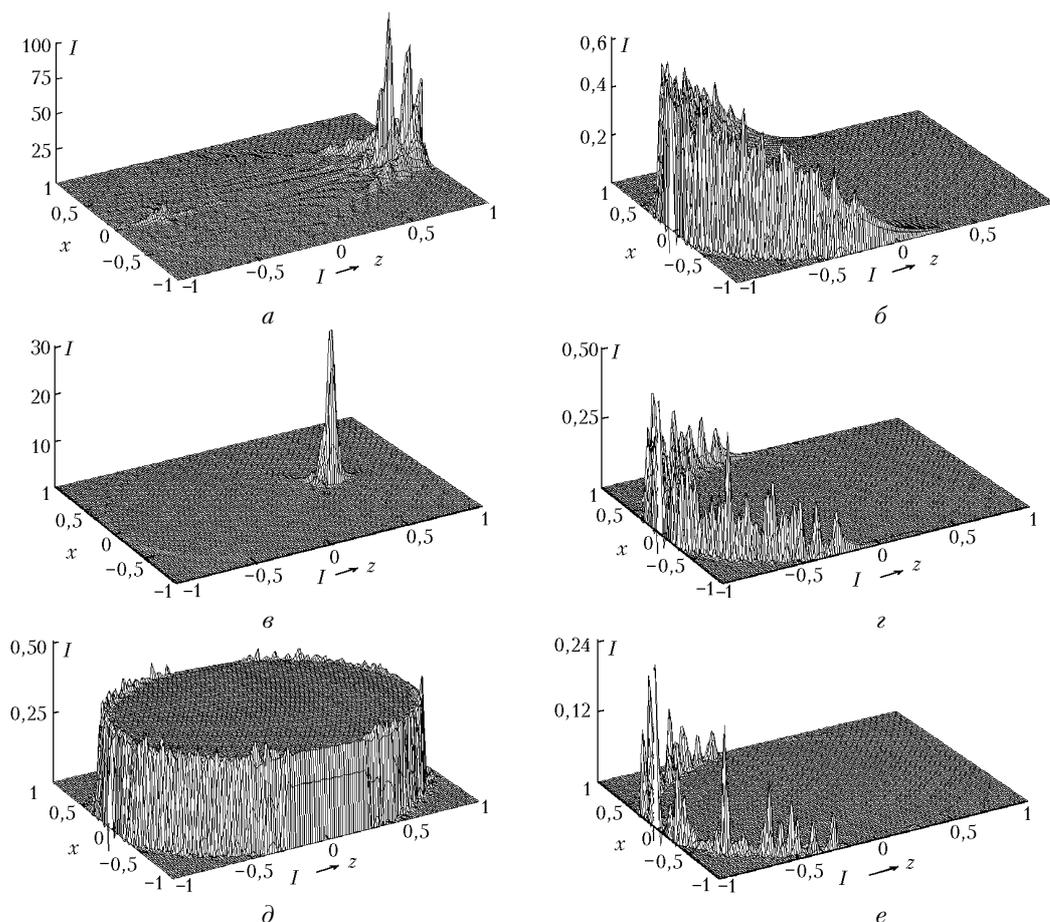


Рис. 1. Интенсивность внутреннего поля $I(r)$ для различных групп атмосферного аэрозоля: *a* – частица аморфного кварца, $\lambda = 0,5$ мкм, $\rho = 100$; *б* – то же, $\lambda = 10,6$ мкм, $\rho = 100$; *в* – частица гематита, $\lambda = 0,5$ мкм, $\rho = 100$; *г* – то же, $\lambda = 10,6$ мкм, $\rho = 100$; *д* – частица сажи, $\lambda = 0,5$ мкм, $\rho = 0,1$; *е* – то же, $\lambda = 10,6$ мкм, $\rho = 100$

любых групп поглощения при малых ρ (рис. 1, δ). Данные результаты свидетельствуют лишь об относительной корректности широко распространенной опто-термодинамической модели частицы, абсолютно поглощающей излучение в тонком поверхностном слое.

2. Фактор эффективности поглощения излучения

Фактор эффективности поглощения излучения Q_{abs} – достаточно хорошо исследованная характеристика не только для оптически однородных [2, 3, 16], но и для многослойных сферических частиц [4, 5]. Поэтому ниже будут приведены лишь самые общие результаты расчетов и анализа этой важнейшей характеристики. На рис. 2, a представлена зависимость

Q_{abs} от ρ для льда при $\lambda = 0,5$ мкм (слабо поглощающие излучение частицы). Видно, что величина Q_{abs} возрастает с ростом ρ , присутствует резонансная структура различной периодичности (морфологически обусловленные резонансы [2]), причем значения Q_{abs} относительно малы по абсолютной величине. Схожий вид зависимостей имеют частицы кварца, корунда, сульфата аммония, капли морской воды. При $\lambda = 10,6$ мкм для частицы льда (рис. 2, b) вначале наблюдается резкое возрастание Q_{abs} с ростом ρ , а затем – выход на определенное предельное значение. Для частиц сажи зависимость Q_{abs} от ρ имеет иной характер: практически отсутствует резонансная структура, абсолютные значения Q_{abs} достаточно велики. Такая картина характерна для сажи как при $\lambda = 0,5$ мкм (рис. 2, δ), так и при $\lambda = 10,6$ мкм (рис. 2, e).

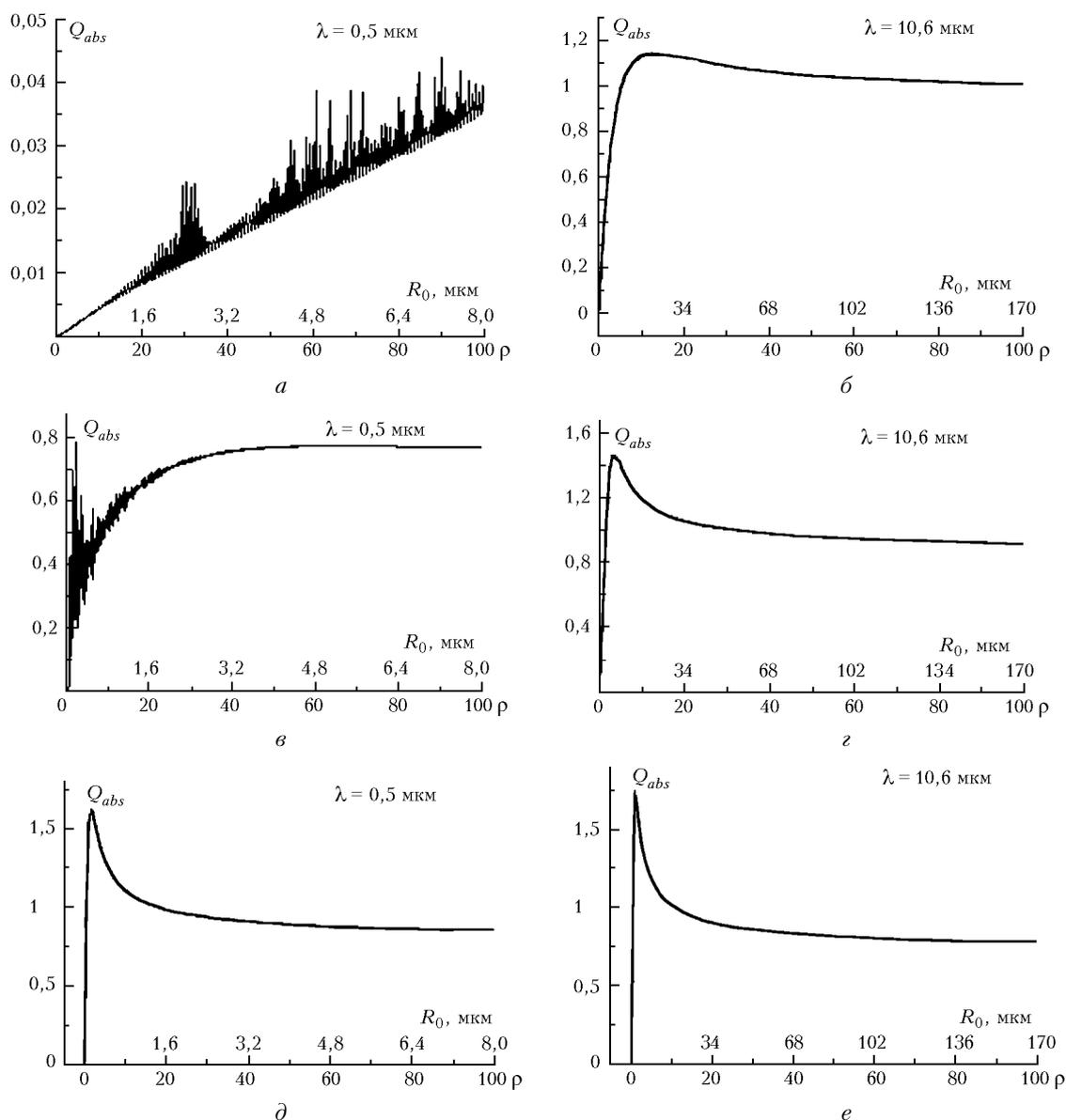


Рис. 2. Фактор эффективности поглощения излучения Q_{abs} как функция ρ для различных групп атмосферного аэрозоля: a – частица льда, $\lambda = 0,5$ мкм; b – то же, $\lambda = 10,6$ мкм; c – частица гематита, $\lambda = 0,5$ мкм; d – то же, $\lambda = 10,6$ мкм; e – частица сажи, $\lambda = 0,5$ мкм; f – то же, $\lambda = 10,6$ мкм

3. Фактор эффективности светового давления

При взаимодействии излучения с аэрозолем происходит обмен импульсом между электромагнитным полем и частицей, что порождает силу светового давления F_{pr} :

$$F_{pr} = \pi R_0^2 |E_0^2| Q_{pr} / (8\pi). \quad (3)$$

Согласно [17] процесс обмена импульсом можно разделить на два этапа: «захват» частицей энергии из поля и частичное ее «переизлучение», вызывающее возврат импульса полю. Таким образом, фактор светового давления Q_{pr} естественным образом входит в комплекс исследуемых МОХ, хотя и не связан непосредственно с тепловым действием поглощенного излучения. Его учет важен при сравнении величин фотофоретических сил и сил светового давления, причем в дальнейшем в основном будет интересна осевая, а не радиальная сила светового давления [18].

На рис. 3, а, б представлены зависимости Q_{pr} от ρ для частицы корунда. При $\lambda = 0,5$ мкм вначале наблю-

дается резкое возрастание Q_{pr} с ростом ρ , затем кривая проходит через острый максимум, а при больших ρ выходит на предельное значение, зависящее от оптических постоянных частицы. Подобное поведение характерно для всех слабо поглощающих излучение частиц при $\lambda = 0,5$ мкм. При $\lambda = 10,6$ мкм для них наблюдается монотонный рост Q_{pr} с возрастанием ρ (по крайней мере, до значений $\rho = 100$), на фоне которого заметны резонансы небольшой амплитуды. Для гематита (умеренно поглощающие частицы) зависимости Q_{pr} от ρ представлены на рис. 3, в, г. При малых значениях дифракционного параметра вновь наблюдается резкий рост величины Q_{pr} (при $\lambda = 0,5$ мкм ее максимальное значение равно 6 для $\rho = 2$), а затем следует выход на предельное значение геометрической оптики. Подобие зависимостей Q_{pr} от ρ для частиц различных веществ известно достаточно давно [19]. Наличие острых максимумов в указанных зависимостях для ряда частиц может быть использовано для манипуляций с микрочастицами в вакууме [20].

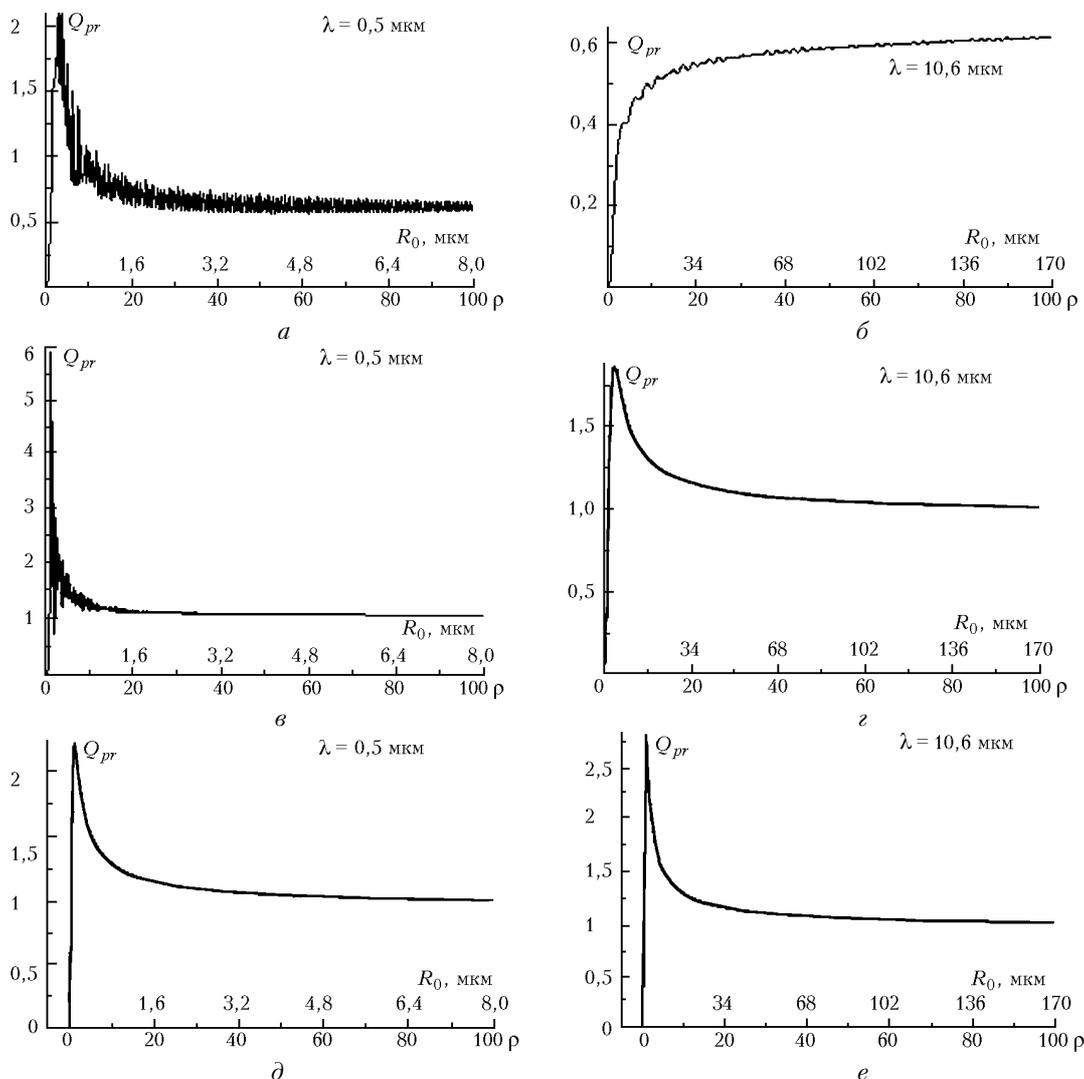


Рис. 3. Фактор эффективности светового давления Q_{pr} как функция ρ для различных групп атмосферного аэрозоля: а – частица корунда, $\lambda = 0,5$ мкм; б – то же, $\lambda = 10,6$ мкм; в – частица гематита, $\lambda = 0,5$ мкм; г – то же, $\lambda = 10,6$ мкм; д – частица сажи, $\lambda = 0,5$ мкм; е – то же, $\lambda = 10,6$ мкм

4. Фактор асимметрии поглощения излучения

В данной статье впервые представлены результаты систематических расчетов фактора J_1 для основных типов атмосферного аэрозоля и выявлены общие закономерности поведения данной характеристики в зависимости от значений n и k в достаточно широком диапазоне дифракционного параметра. В [1] указана связь J_1 с величинами силы и скорости фотофоретического движения частиц. В частности, фотофоретическая сила

$$F_{ph} = -\frac{2\pi}{3} \left(\frac{\pi M}{8RT} \right)^{1/2} R_0^2 I_0 J_1(\rho, m) F(K_n, \Lambda, \alpha_E, \alpha_r, \alpha_n), \quad (4)$$

где M – молярная масса газа; T – температура; R – универсальная газовая постоянная; I_0 – интенсивность падающего монохроматического излучения; $F(K_n, \Lambda, \alpha_E, \alpha_r, \alpha_n)$ – сложная функция числа Кнудсена

K_n , отношения теплопроводностей частицы и газа Λ , коэффициентов аккомодации импульса и энергии молекул газа на поверхности частицы. Было обнаружено, что направление скорости движения частиц (положительный или отрицательный фотофорез) полностью определяется знаком J_1 . Варьированием газокинетических и аккомодационных характеристик невозможно изменить знак силы и скорости фотофореза. Так как сила и скорость фотофореза линейно зависят от фактора J_1 , то его численные значения определяют и их абсолютные величины. Величина J_1 изменяется в пределах $-0,5 \leq J_1 \leq 0,5$ (при отрицательных значениях J_1 преимущественно нагрета фронтальная сторона частицы, при положительных значениях – тыльная сторона). Образно говоря, фактор асимметрии связан с положением центра тяжести внутренних источников тепла в частице.

На рис. 4,а представлена зависимость J_1 от ρ для капель морской воды при $\lambda = 0,5$ мкм (для них

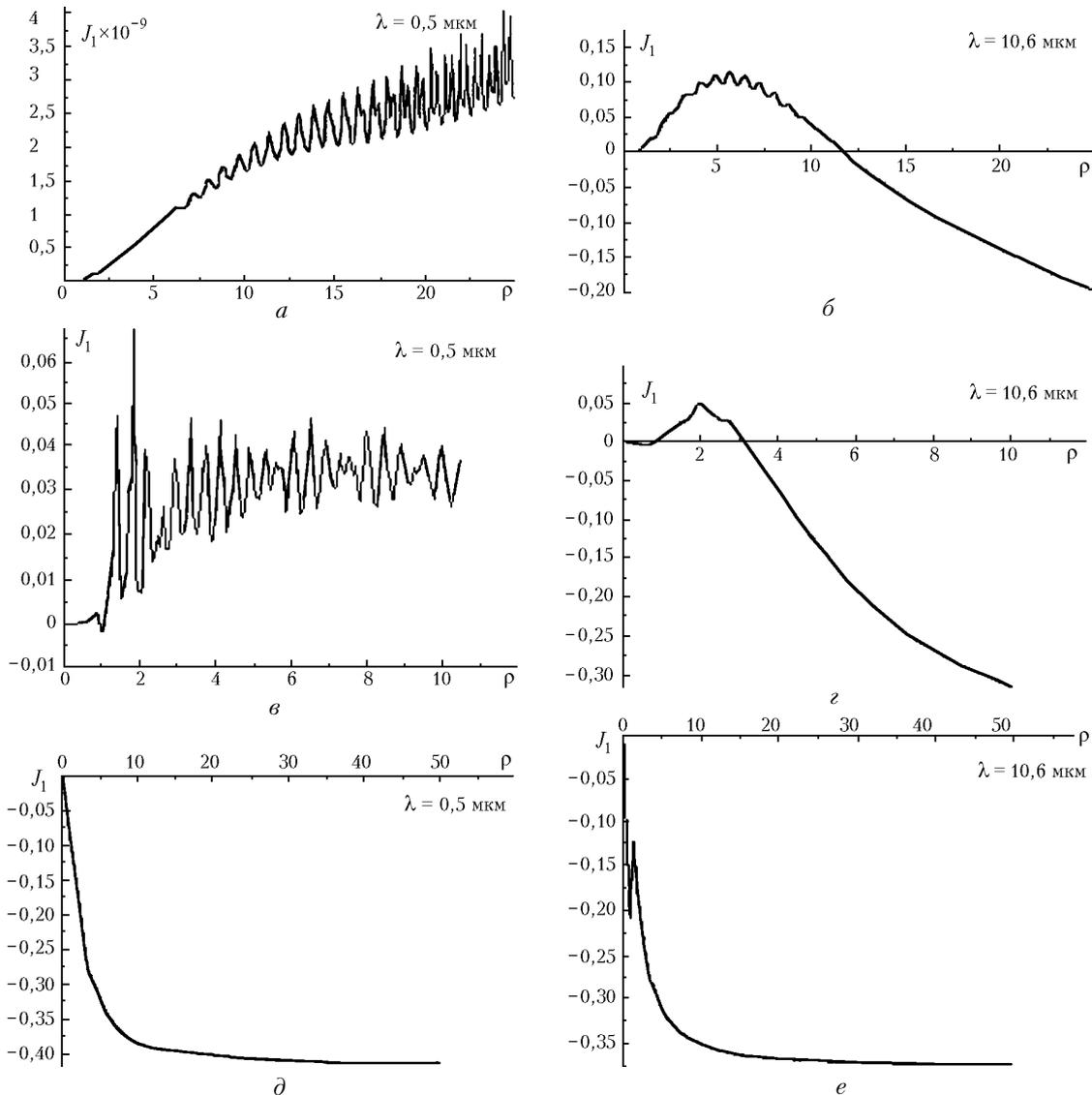


Рис. 4. Фактор асимметрии поглощения излучения J_1 как функция ρ для различных групп атмосферного аэрозоля: а – капля морской воды, $\lambda = 0,5$ мкм; б – частица кварца, $\lambda = 10,6$ мкм; в – частица гематита, $\lambda = 0,5$ мкм; г – то же, $\lambda = 10,6$ мкм; д – частица сажи, $\lambda = 0,5$ мкм; е – то же, $\lambda = 10,6$ мкм

значения $\kappa \leq 10^{-4}$). Для таких слабопоглощающих частиц характерны рост величины J_1 с возрастанием ρ , промодулированный наличием резонансной структуры, и относительно малые положительные значения J_1 . Данные частицы могут испытывать только отрицательный фотофорез (т.е. двигаться навстречу распространению излучения), причем скорости ожидаемого фотофоретического движения будут исчезающе малы. Для частиц с $\kappa \approx 10^{-1} \div 10^{-2}$ (умеренно поглощающие частицы) вид зависимости имеет совершенно иной характер: J_1 положителен при малых и достаточно умеренных (единицы) значениях ρ , затем наблюдаются переход в область отрицательных значений и плавное уменьшение J_1 с дальнейшим ростом ρ . Так, при $\lambda = 10,6$ мкм для частицы кварца (рис. 4,б) J_1 меняет знак на отрицательный при $\rho \approx 12$, в то время как для частиц гематита при (рис. 4,з) при $\rho \approx 3$.

Таким образом, частицы указанных веществ различных размеров должны демонстрировать в эксперименте изменение знака фотофоретической силы. Для сильнопоглощающих частиц с $\kappa > 0,1$ (частицы сажи) зависимости J_1 от ρ представлены на рис. 4,д,е. Знак фактора J_1 – отрицательный, что свидетельствует о случае положительного фотофореза. Абсолютные значения J_1 для достаточно крупных частиц сажи велики, что говорит о больших возможных величинах фотофоретической силы и скорости.

5. Фактор асимметрии поглощения излучения для модельных частиц

Попытаемся обобщить полученные результаты для J_1 для так называемых модельных частиц. Напомним, что для них задаются значения n и κ , не нарушающие соотношения Крамерса–Кронига [6]. На рис. 5 представлены зависимости J_1 от ρ для модельных частиц с $n = 1,0 \div 3,0$ и $\kappa = 0,00001 \div 5,0$. Характерной особенностью для частиц с $n = 1,5 \div 3,0$ и $\kappa = 0,01 \div 0,1$ является возможность как положительного, так и отрицательного фотофореза в зависимости от размера частиц при фиксированной длине волны падающего излучения. Абсолютные значения положительных J_1 достаточно велики (от 0,03 до 0,15); диапазон ρ , в котором реализуются эти значения, также достаточно протяженный (вплоть до $\rho \approx 10$). В верхней атмосфере при соответствующих давлениях газа такие частицы могут испытывать фотофоретическую левитацию (сила тяжести частицы и сила светового давления уравниваются фотофоретической силой) либо даже двигаться вверх навстречу солнечному излучению. Данный вопрос является достаточно традиционным (см., например, [21–23]), однако до сегодняшнего дня не существует корректной модели вертикального переноса стратосферного и тропосферного аэрозоля

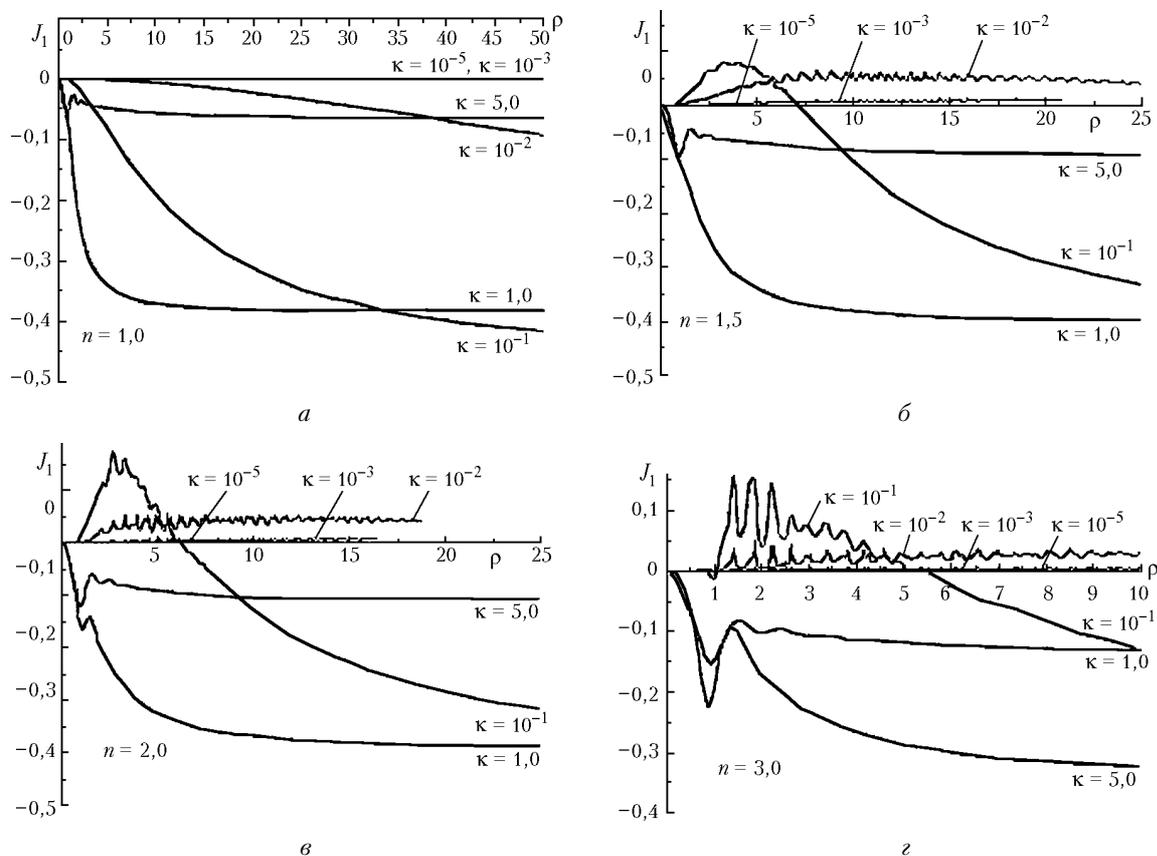


Рис. 5. Зависимость фактора асимметрии поглощения излучения J_1 от дифракционного параметра ρ для модельных частиц с $n = 1,0; 1,5; 2,0; 3,0$ и $\kappa = 10^{-5}; 10^{-3}; 10^{-2}; 10^{-1}; 1,0; 5,0$

с учетом действия фотофореза (недавно предложенные модели [24, 25] имеют ряд существенных недостатков).

Заключение

В данной работе впервые представлены результаты систематического анализа МОХ распространенных типов атмосферного аэрозоля. Анализ позволил выявить общие закономерности поведения указанных характеристик. Планируется продолжить начатые исследования при использовании модели двухслойных частиц, что приблизило бы ожидаемые результаты к результатам, полученным для реальных атмосферных аэрозолей. Эти данные предполагается использовать для разработки новой модели вертикального переноса стратосферного и тропосферного аэрозолей, где наряду с седиментационно-диффузионным механизмом был бы учтен и фотофоретический механизм. Возможно, что результаты расчетов по этой модели помогут объяснить наблюдаемую стратификацию стратосферного аэрозоля [26].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 99-01-00143 и № 01-01-96451) и Программы сотрудничества Минобразования и Минобороны Российской Федерации «Научно-инновационное сотрудничество».

1. *Летфулова Л.Б., Старинов А.В., Береснев С.А.* Поглощающие свойства атмосферного аэрозоля: анализ микрофизических оптических характеристик // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 1. С. 69–75.
2. *Irvine W.M.* Light scattering by spherical particles: radiation pressure, asymmetry factor and extinction cross section // J. Opt. Soc. Amer. 1965. V. 55. № 1. P. 16–21.
3. *Kokhanovsky A.A., Zege E.P.* Optical properties of aerosol particles: a review of approximate analytical solutions // J. Aerosol Sci. 1997. V. 28. № 1. P. 1–21.
4. *Пришивалко А.П., Бабенко В.А., Кузьмин В.Н.* Рассеяние и поглощение света неоднородными и анизотропными частицами. Минск: Наука и техника, 1984. 263 с.
5. *Mackowski D.W., Altenkirch R.A., Menguc M.P.* Internal absorption cross sections in a stratified sphere // Appl. Opt. 1990. V. 29. № 10. P. 1551–1559.
6. *Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 664 с.
7. *Barber P.W., Hill S.C.* Light scattering by particles: computational methods. Singapore: World Scientific Publ., 1990. 261 p.
8. *Mackowski D.W.* Photophoresis of aerosol particles in the free molecular and slip-flow regimes // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1989. V. 32. № 5. P. 843–854.

9. *Ивлев Л.С., Андреев С.Д.* Оптические свойства атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. 360 с.
10. *Зуев В.Е., Креков Г.Н.* Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 256 с.
11. *Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова В.Е.* Оптические постоянные природных и технических сред: Справочник. Л.: Химия, 1984. 216 с.
12. *Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Поздняков Д.В.* Атмосферный аэрозоль. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 224 с.
13. *Dusel P.W., Kerker M., Cooke D.D.* Distribution of absorption centers within irradiated spheres // J. Opt. Soc. Amer. 1979. V. 69. № 1. P. 55–59.
14. *Greene W.M., Spjut R.E., Bar-Ziv E., Sarofim A.F., Longwell J.P.* Photophoresis of irradiated spheres: absorption centers // J. Opt. Soc. Amer. B. 1985. V. 2. № 6. P. 998–1004.
15. *Астафьева Л.Г., Пришивалко А.П.* Особенности оптических полей внутри сферических частиц с относительным показателем преломления $\bar{n} < 1$ // Оптика и спектроскопия. 1990. Т. 69. № 2. С. 398–401.
16. *Зуев В.Е.* Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М.: Сов. радио, 1970. 496 с.
17. *Шифрин К.С., Зельманович И.Л.* Световое давление на капли воды // Оптика и спектроскопия. 1964. Т. 17. № 1. С. 113–118.
18. *Зуев В.Е., Копытин Ю.Д., Кузиковский А.В.* Нелинейные оптические эффекты в аэрозолях. Новосибирск: Наука, 1980. 184 с.
19. *Шифрин К.С.* Световое давление на частицы различных веществ // Оптика и спектроскопия. 1965. Т. 18. № 4. С. 690–697.
20. *Ashkin A., Dziedzic J.M.* Optical levitation in high vacuum // Appl. Phys. Lett. 1976. V. 28. № 6. P. 333–335.
21. *Orr C., Keng E.Y.H.* Photophoretic effects in the stratosphere // J. Atmos. Sci. 1964. V. 21. № 9. P. 475–478.
22. *Кейдл Р.* Твердые частицы в атмосфере и в космосе. М.: Мир, 1969. 285 с.
23. *Tehrani S., Giovane F., Blum J., Xu Y.-L., Gustafson B.A.S.* Photophoresis of micrometer-sized particles in the free-molecular regime // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2001. V. 44. P. 1649–1657.
24. *Periasamy R., Yamamoto T., Donovan R.P., Clayton A.C.* Particle-transport at subatmospheric pressures-models and verification // J. Electrochem. Soc. 1993. V. 140. № 10. P. 2949–2951.
25. *Pueshel R.F., Verma S., Rohatschek H., Ferry G.V., Boiadjieva N., Howard S.D., Strawa A.W.* Vertical transport of anthropogenic soot aerosol into the middle atmosphere // J. Geophys. Res. D. 2000. V. 105. № 3. P. 3727–3736.
26. *Cheremisina A., Granitskii L., Myasnikov V., Vetchinkin N.* Improved aerosol scattering in the upper atmosphere, according to data of ultraviolet observations from space, with instrumental smoothing taken into account // Proc. SPIE. 2000. V. 4341. P. 383–389.

S.A. Beresnev, L.B. Kochneva, P.E. Suetin. Calculation and analysis of microphysical optical characteristics of atmospheric aerosol: the model of homogeneous spherical particles.

The calculations of microphysical optical characteristics on the basis of Lorenz-Mie theory (the internal – field intensity, the absorption efficiency factor, the photophoretic asymmetry factor, and the light pressure factor) for some reference types of atmospheric aerosol are presented. In order to simplify the analysis, a model of homogeneous spherical particles is considered. The result of the analysis allows one to establish the general regularities in the behavior of the indicated characteristics for strongly, moderately and weakly absorbing particles. The special attention is given to the analysis of the photophoretic asymmetry factor J_1 . The features in J_1 behavior for reference types of the atmospheric aerosol are detected. In particular, for particles with $n = 1,5+3,0$ and $\kappa = 0,01+0,1$ the opportunity for both negative ($J_1 > 0$), and positive ($J_1 < 0$) photophoresis is supervised. The obtained results are planned to be used for development of the model of vertical transport of the stratospheric aerosol.