

**С.А. Береснев, Ф.Д. Ковалев, Л.Б. Кочнева,  
В.А. Рунков, П.Е. Суетин, А.А. Черемисин\***

## **О возможности фотофоретической левитации частиц в стратосфере**

*Уральский государственный университет, г. Екатеринбург  
\* Научно-исследовательский физико-технический институт  
Красноярского государственного университета, г. Красноярск*

Поступила в редакцию 26.04.2002 г.

Представлены результаты оценок возможности фотофоретической левитации частиц определенных типов атмосферного аэрозоля в стратосфере. Проанализированы газокинетический и электродинамический аспекты проблемы, условия и высоты левитации частиц с известными оптическими и теплофизическими свойствами. Уменьшение эффективной теплопроводности и плотности реальных аэрозольных частиц, часто представляющих собой рыхлые, но компактные агломераты, при условии достаточно сильного поглощения солнечного излучения приводит к тому, что фотофоретические силы становятся сопоставимыми с силами тяжести. Показана возможность левитации углеродных сажевых частиц различного типа в нижней стратосфере на высотах 15–33 км за счет фотофоретических сил.

### **Введение**

Возможность вертикального подъема и левитации частиц определенных типов атмосферного аэрозоля на больших высотах за счет действия фотофоретических сил обсуждается уже не одно десятилетие [1]. Многочисленные наблюдаемые факты свидетельствуют о наличии и аномально продолжительном пребывании в стратосфере углеродных частиц различной природы, частиц вулканического аэрозоля и т.д. [2, 3].

Большой интерес вызывает вопрос о природе и условиях формирования устойчивых аэрозольных слоев на различных высотах в стратосфере и мезосфере, самым известным из которых является слой Юнге. Все это мотивирует поиски силовых механизмов, проявляющихся в специфических условиях больших высот и обеспечивающих вертикальный перенос частиц против силы тяжести. Модели вертикального переноса, основанные на идее седиментационно-диффузионного равновесия, например [4–7], сталкиваются с затруднениями при описании наблюдаемой высотной стратификации аэрозоля [8].

Одной из возможных причин движения частиц против силы тяжести считается явление отрицательного фотофореза – движение частиц навстречу падающему солнечному излучению [9]. К настоящему времени нет единой точки зрения на потенциальную значимость данного эффекта. Так, на основании известных результатов [10] сформировалось утверждение, что в свободномолекулярном режиме в поле солнечного излучения (условия, характерные для стратосферы и мезосферы) силы отрицательного и положительного фотофореза не превышают нескольких

процентов от силы тяжести, действующей на частицу. Недавние аналогичные оценки [11] исправляют неточности расчетов в работе [10] и увеличивают это соотношение для тех же условий до 20% для положительного и примерно до 10% для отрицательного фотофореза.

В работе [12] предложена модель вертикального переноса аэрозолей, основанная на возможности так называемого  $\Delta\alpha$ -гравитофотофореза [13]. Сущность этого явления, отличного от классического радиометрического фотофореза [9], заключается в возникновении вертикальных отрицательных сил за счет различия коэффициентов аккомодации молекул газа на поверхности частиц. При этом авторы полагают, что значения этих коэффициентов могут меняться весьма значительно (от 15 до 50%) для различных участков поверхности аэрозольных частиц высокой теплопроводности. Тогда, действительно, данные силы могут обеспечить вертикальный перенос углеродных частиц в стратосфере и мезосфере.

Между тем оценки «силовых возможностей» классического радиометрического фотофореза далеко не завершены. Причиной этого является комплексность явления фотофореза – необходимость как электродинамического, так и газокинетического анализа проблемы при учете сложной структуры реальных аэрозольных частиц. В данной статье анализируется возможность вертикального переноса атмосферных аэрозолей на основе оценок в рамках молекулярно-кинетической теории фотофореза [14]. Оценки показывают, что отрицательный радиометрический фотофорез способен быть причиной левитации частиц некоторых типов стратосферного аэрозоля.

# 1. Основные результаты теоретического анализа явления фотофореза

## 1.1. Газокинетический аспект

В [14] представлена последовательная молекулярно-кинетическая теория радиометрического фотофореза, охватывающая весь диапазон изменения числа Кнудсена  $Kn$  ( $Kn = l/R_0$ , где  $l$  – средняя длина свободного пробега молекул газа;  $R_0$  – эффективный аэродинамический радиус частицы) при произвольном соотношении коэффициентов теплопроводности частицы и газа  $\Lambda = \lambda_p/\lambda_g$ , учитывающая оптические и аккомодационные свойства системы частица–газ. Одним из основных результатов использования теории является соотношение для фотофоретической силы, действующей на однородную сферическую частицу, полученное в зависимости от значений определяющих параметров задачи:

$$F_{ph} = -\frac{2\pi}{3} \left( \frac{\pi M}{8RT_0} \right)^{1/2} R_0^2 I J_1(\rho, m) F(Kn, \Lambda), \quad (1)$$

где  $I$  – интенсивность падающего излучения;  $M$  – молярная масса газа;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T_0$  – характерная температура газа;  $J_1$  – так называемый фактор асимметрии поглощения излучения, возникающий при решении электродинамической части задачи и интегрально оценивающий «центр тяжести» источников тепла электромагнитной природы в объеме частицы:

$$J_1 = 3nkr \int_0^\pi \sin\theta P_1(\cos\theta) d\theta \int_0^1 x^3 B(x, \theta, \phi = \frac{\pi}{4}) dx, \quad (2)$$

где  $B(x, \theta, \phi)$  – безразмерная функция распределения источников электромагнитной энергии внутри частицы;  $\rho = 2\pi R_0/\lambda$  – дифракционный параметр;  $m = n + ik$  – комплексный показатель преломления вещества частицы;  $x = r/R_0$  – безразмерная радиальная координата.

Величина  $F(Kn, \Lambda)$  в (1) является сложной функцией числа  $Kn$ , теплофизического параметра  $\Lambda$ , коэффициентов аккомодации импульса и энергии молекул газа на поверхности частицы и, в общем случае, рассчитывается численно. В [14] приведены аналитические аппроксимации функции  $F$ , позволяющие рассчитывать величину фотофоретической силы в случае полной аккомодации с погрешностью не более 3% для всего диапазона чисел  $Kn$  при любых значениях параметра  $\Lambda$ :

$$F(Kn) = \Psi_1 / (1 + \Lambda \Psi_2), \quad (3)$$

где

$$\Psi_1 = \frac{Kn}{Kn + 5\pi/18} \left( 1 + \frac{2\pi^{1/2}Kn}{5Kn^2 + \pi^{1/2}Kn + \pi/4} \right),$$

$$\Psi_2 = \left( \frac{1}{2} + \frac{15}{4}Kn \right) \left( 1 - \frac{1,21\pi^{1/2}Kn}{100Kn^2 + \pi/4} \right).$$

Зависимость фотофоретической силы от давления газа  $p$  (или связанного с ним обратного числа

$Kn$ ) имеет характерный куполообразный вид с максимумом при  $Kn \approx 0,3 \div 0,4$  в зависимости от значения параметра  $\Lambda$ , что хорошо согласуется с экспериментом [15]. Для частиц фиксированных размеров это условие определяет область давлений газа, а при фиксированном давлении – диапазон размеров частиц при максимально возможных значениях фотофоретической силы. Отметим, что фотофоретическая сила максимальна в промежуточном, но не в свободномолекулярном режиме ( $Kn \geq 10$ ).

## 1.2. Фактор асимметрии поглощения излучения

Фактор асимметрии  $J_1$  является основным результатом решения электродинамической части задачи. Он определяется внутренним электромагнитным полем в частице и зависит от величины дифракционного параметра  $\rho$  и комплексного показателя преломления вещества частицы  $m$ . Его величина изменяется в пределах  $-0,5 < J_1 < 0,5$ . Отрицательные значения  $J_1$  соответствуют преимущественному нагреву фронтальной к излучению стороны частицы и отвечают так называемому положительному фотофорезу (движению частиц в направлении излучения при отсутствии силы тяжести), а положительные значения – преимущественному нагреву тыльной стороны и отрицательному фотофорезу (движению против распространения излучения). Отметим, что фактор асимметрии и качественно, и количественно характеризует фотофоретические силы, действующие на частицы аэрозолей, при сложном характере распределения интенсивности внутреннего поля в объеме этих частиц (рис. 1).

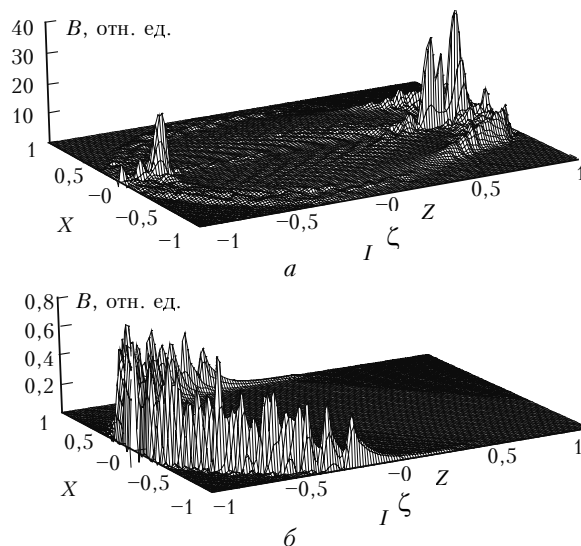


Рис. 1. Интенсивность внутреннего поля для частицы льда при  $\rho = 100$ : а –  $\lambda = 0,5$  мкм,  $m = 1,312 + 0,0001i$ ; б –  $\lambda = 10,6$  мкм,  $m = 1,153 + 0,124i$

Нами были проведены систематические расчеты фактора  $J_1$  для основных типов атмосферного аэрозоля и модельных частиц с задаваемыми значениями  $n$  и  $k$ , удовлетворяющими соотношениям Крамерса–

Кронига. Расчеты проводились для модели сферических однородных частиц в поле монохроматического неполяризованного излучения в достаточно широком диапазоне изменения дифракционного параметра  $\rho$ . Анализ полученных результатов подтверждает обоснованность разделения основных типов атмосферного аэрозоля на слабо, умеренно и сильно поглощающие излучение частицы, как это предложено в [16]. Для каждого класса частиц обнаружены специфические особенности зависимости фактора  $J_1$  от значений  $\rho$ ; выявлены закономерности изменения знака  $J_1$ , позволяющие предсказать направление и интенсивность фотофоретического движения частиц.

Характерной особенностью для аэрозолей с  $n \approx 1,5 \div 3,0$  и  $k \approx 0,001 \div 0,5$  является возможность как положительного, так и отрицательного фотофореза в зависимости от размера частиц при заданной длине волны падающего излучения (рис. 2).

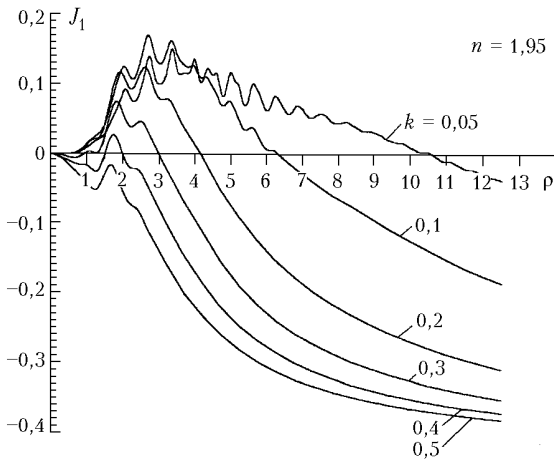


Рис. 2. Зависимость фактора асимметрии поглощения излучения  $J_1$  от дифракционного параметра  $\rho$  для модельных углеродных частиц с  $n = 1,95$  и  $k = 0,05 \div 0,5$

В отсутствие силы тяжести положительный знак  $J_1$  означает, что частицы должны двигаться в направлении распространения излучения, а отрицательный – против направления распространения излучения. Данная особенность, наряду с наличием максимума фотофоретической силы в промежуточном по числам  $K_p$  режиме, потенциально обеспечивает возможность образования пространственных слоев левитирующих частиц в стратосфере при отсутствии интенсивного конвективного перемешивания газа. В работе [17] показано, что учет спектрального состава падающего излучения приводит к сглаживанию кривой для  $J_1$ , устранению морфологически обусловленных резонансов, но существенно не меняет характер зависимости величины  $J_1$  от дифракционного параметра  $\rho$ .

## 2. О конкуренции сил тяжести и фотофореза для частиц в поле солнечного излучения

Оценим возможное соотношение сил, действующих на типичные аэрозольные частицы в поле солнеч-

ного излучения в спокойной атмосфере. Допустим, что частицы, заброшенные на большие высоты вулканическим извержением или попавшие туда из космического пространства, начинают оседать в нижние слои атмосферы. На них действуют сила тяжести  $F_g$  и фотофоретическая сила  $F_{ph}$ . Если частица испытывает только положительный фотофорез, то все силы имеют одинаковый знак и левитация частиц принципиально невозможна. Если же частица испытывает отрицательный фотофорез, то на определенной высоте  $Z^*$  сила отрицательного фотофореза  $F_{ph}^-$  может уравновешивать силу тяжести, а условие левитации определяется соотношением

$$F_{ph}^- + F_g = 0. \quad (4)$$

В (4) учтено, что по оценкам согласно [18] силы светового давления пренебрежимо малы по сравнению с силой тяжести.

Анализ знака зависимости фактора  $J_1$  от дифракционного параметра  $\rho$  (в частности, рис. 2) позволяет определить диапазон изменения оптических постоянных частиц, при котором возможен отрицательный фотофорез, а также оценить возможный интервал размеров частиц-кандидатов (при  $\lambda = 0,5$  мкм он соответствует условию  $0,05 \text{ мкм} \leq R_0 \leq 2,0 \text{ мкм}$  для различных типов аэрозолей). Отрицательный фотофорез той или иной степени интенсивности присущ частицам льда, силикатов, окислов металлов (гематит и корунд), каплям морской воды и кислот, частицам солей (сульфат аммония, хлористый натрий) и т.д. [16]. Заметим, что возможность отрицательного фотофореза указанных частиц еще не означает возможности их левитации, так как силы тяжести могут превосходить фотофоретические силы. Для того чтобы фотофоретические силы были достаточно большими и сопоставимыми с силой тяжести в условиях стратосферы и мезосферы, величины  $J_1$  также должны быть достаточно велики и, как показывает анализ, фактически должны достигать максимально возможных значений. Таким образом, это должны быть достаточно сильно поглощающие излучение частицы. В этой связи особый интерес вызывает возможность отрицательного фотофореза углеродных частиц различного происхождения.

После преобразований условие левитации (4) с учетом (1) приобретает вид

$$\frac{IJ_1 F(K_p^*, \lambda)}{2(8RT^*/\pi M)^{1/2} R_0 \rho_p g} = 1, \quad (5)$$

где  $\rho_p$  – плотность вещества частицы;  $g$  – ускорение свободного падения;  $T^*$  – задаваемая в расчетах температура;  $K_p^*$  – число Кнудсена, при котором возможна левитация;  $I = 1368 \cdot \text{Вт}/\text{м}^2$  – солнечная постоянная. Давление воздуха связано с средней длиной свободного пробега соотношением  $p = 6,797 \cdot 10^{-3}/l$ , используется стандартная модель атмосферы для  $p(Z)$  и  $T(Z)$ .

Как показали расчеты, при использовании значений плотности и теплопроводности, характерных для массивных сплошных материалов и веществ, условие

левитации (4) не может быть выполнено для стратосферы и мезосферы, так как силы тяжести значительно превышают фотофоретические силы. Этот результат соответствует результатам работы [10]. Тем не менее, основываясь на известном факте, что реальные аэрозольные частицы микронного и субмикронного размеров, как правило, являются агрегатами из более мелких частиц или многослойными частицами, возможно варьировать значения теплофизических параметров частиц относительно их значений для массивных образцов, используя при этом для оценки сил модель фотофореза неоднородных сферических частиц [14].

Условие левитации чрезвычайно чувствительно к теплофизическим характеристикам частиц – их плотности и теплопроводности. В условиях стратосферы и мезосферы для частиц указанных размеров реализуется так называемый свободномолекулярный режим. И, как нетрудно видеть при упрощении соответствующим образом уравнения (5), выполнение этого условия фактически зависит от фактора, являющегося произведением теплопроводности частицы на ее плотность. При определенном уменьшении величины этого произведения условие левитации может быть выполнено.

Хорошо известно, что эффективная плотность и теплопроводность вторичных частиц-агрегатов могут быть значительно меньше характеристик массивных образцов [19]. Вторичные аэрозоли, в частности углеродные частицы, могут представлять собой компактные агрегаты, морфологически более сходные с изометрическими частицами [20], либо иметь вид фрактальных аэрозольных кластеров. При микроскопическом анализе проб атмосферных аэрозолей также обнаруживаются так называемые «сферы сгорания» [21] – гладкие сферические частицы, часто пористые, размерами 0,1 ÷ 10 мкм, образующиеся при высокотемпературных процессах горения, в том числе при сжигании нефти и каменного угля, что подтверждается особенностями их химического состава. Плотность и теплопроводность таких частиц заметно меньше характеристик массивных образцов.

Таким образом, кандидатами для фотофоретической левитации в поле солнечного излучения являются частицы со следующими специфическими свойствами: 1) достаточно большие, но не чрезмерные значения показателя поглощения  $k \leq 0,4$ , обеспечивающие высокие значения фактора  $J_1$ ; 2) достаточно малые эффективные значения плотности и теплопроводности частиц.

### 3. Оценки условий левитации углеродных частиц

Как известно, углеродные («сажевые») частицы различной морфологии, размеров и происхождения ответственны за поглощающие свойства атмосферного аэрозоля и оказывают существенное влияние на радиационный баланс [22]. Известные значения оптических и теплофизических характеристик углеродных частиц имеют большой разброс (таблица).

Оптические и теплофизические характеристики углеродных частиц

Характеристика	Значение параметра
$m = n + ik$ при $\lambda = 0,5$ мкм	1,95 + 0,3i [10, 11]; 1,95 + 0,66i [13]; 1,75 + 0,44i [23]; 2,0 + 1,0i [13] – максимально возможное значение для углеродных частиц
$\rho_p$ , кг/м <sup>3</sup>	280 ÷ 570 [24] (древесный уголь); 165 [25]; 80 [20] – минимально возможное значение для компактных агрегатов; 2250 [24] – максимально возможное значение для массивных образцов
$\lambda_p$ , Вт/(м · К)	0,167 [24] (древесный уголь); 0,07 ÷ 0,12 [25]; 75 ÷ 100 [24] (графит реакторный) – максимально возможное значение для массивных образцов
$\Lambda = \lambda_p / \lambda_g$ при $T = 220$ К	2,7 ÷ 4,6 (на основе [25])

Результаты оценок высоты левитации  $Z^*$  углеродных частиц определенных свойств ( $n = 1,95$ ,  $k = 0,05 \div 0,4$ ,  $\rho_p = 165$  кг/м<sup>3</sup>,  $\Lambda = 5$ ) представлены на рис. 3. Видно, что частицы с различными значениями показателя поглощения  $k$  могут испытывать левитацию

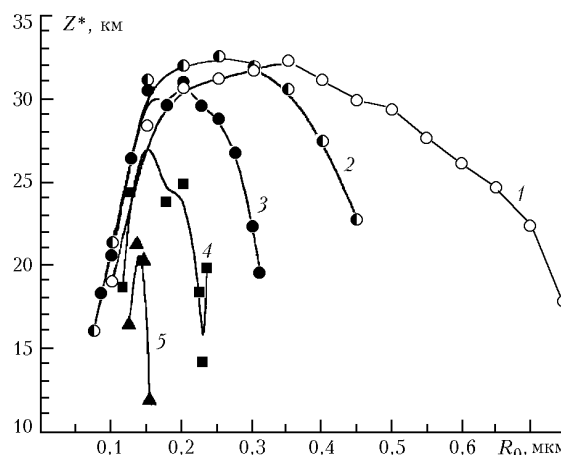


Рис. 3. Зависимость высоты фотофоретической левитации  $Z^*$  в стратосфере от радиуса углеродных частиц  $R_0$ :  $\rho_p = 165$  кг/м<sup>3</sup>;  $\Lambda = 5$ ;  $T = 220$  К;  $I = 1368$  Вт/м<sup>2</sup>;  $n = 1,95$ ; 1 –  $k = 0,05$ ; 2 – 0,1; 3 – 0,2; 4 – 0,3; 5 – 0,4

за счет сил отрицательного радиометрического фотофореза на высотах в диапазоне 15 – 33 км, что соответствует промежуточному и свободномолекулярному режиму и условиям нижней стратосферы. Левитация невозможна для субмикронных частиц  $R_0 < 0,05$  мкм (здесь значения  $J_1$  либо слишком малы, и сила тяжести превышает фотофоретическую силу, либо отрицательны, что соответствует положительному фотофорезу) и для частиц  $R_0 > 0,8$  мкм (при этих значениях фактор  $J_1$  отрицателен). Очевидны общие закономерности поведения частиц с различными значениями показателя поглощения: чем больше  $k$ , тем ниже максимальная высота левитации и уже допустимый диапазон размеров частиц. При этом максимум высоты левитации смещается влево по шкале размеров частиц с ростом величины  $k$ . Важно отметить, что частицы

с  $k = 0,05$  демонстрируют свойство, которое можно характеризовать как стратификацию аэрозольного слоя: частицы размерами в достаточно широком диапазоне (0,2–0,5 мкм) левитируют в узком высотном интервале 30–33 км.

Использованные в расчетах значения теплофизических параметров ( $\rho_p = 165 \text{ кг/м}^3$  и  $\Lambda = 5$  [25]) позволяют качественно и количественно описать [14, 15] известные экспериментальные данные [20] по фотофорезу углеродных частиц. В то же время использование значений параметров, характерных для массивных образцов (например,  $\rho_p \approx 2000 \text{ кг/м}^3$  и  $\Lambda \geq 150$ ), приводит к невозможности левитации данных частиц: они, во-первых, слишком тяжелы и, во-вторых, имеют малый перепад температуры на поверхности, что резко уменьшает действие фотофоретических сил.

Отметим, что полученный из оценок диапазон высот, на которых возможна левитация углеродных частиц (15–33 км), согласуется с сообщениями об обнаружении сажевых частиц на высотах свыше 20 км, приведенными в работах [2, 12].

#### 4. О модели вертикального переноса стратосферного аэрозоля с учетом действия фотофоретических сил

Видно, что фотофоретические силы являются существенным фактором, влияющим на вертикальный перенос аэрозольных частиц определенных типов и конкурирующим по величине с силой тяжести. Они должны быть учтены в моделях, описывающих пространственно-временное распределение стратосферных аэрозолей различного химического состава и размеров частиц. В данной статье рассмотрена более узкая задача учета силового «фотофоретического» блока такого рода моделей при отсутствии диффузионного перемешивания и коагуляции частиц.

В дальнейшем представляется необходимым рассмотреть случай двухслойных частиц. Присутствие частиц такого рода с углеродным (сажевым) ядром на больших высотах обсуждается, в частности, в монографии [22]. Предварительные оценки показывают, что для таких частиц могут существенно измениться величина и даже знак фактора асимметрии  $J_1$ , а значит, изменятся и условия возможной левитации таких частиц.

Важным представляется также рассмотрение фотофореза аэрозольных частиц с учетом поля теплового излучения Земли [26]. В частности, поглощающие свойства целого ряда аэрозолей коренным образом различаются для видимого и инфракрасного диапазонов длин волн падающего излучения. При этом частицы могут переходить из категории слабо или умеренно поглощающих излучение в категорию сильно поглощающих (см. рис. 1 для частиц льда). Положительный фотофорез, испытываемый такими частицами в поле теплового излучения Земли, будет способствовать их движению против силы тяжести и смягчать условия левитации. Например, оценки показывают, что силы отрицательного фотофореза, действуя-

щие на частицы льда, кварца и гематита в поле солнечного излучения, оказываются меньшими сил тяжести и левитация таких частиц невозможна. Учет положительного фотофореза от теплового излучения может изменить этот вывод на противоположный. Обоснованию и анализу данного явления будет посвящена отдельная статья.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 01-01-96451) и Программы сотрудничества Минобразования и Минобороны РФ «Научно-инновационное сотрудничество».

1. Кейдл Р. Твердые частицы в атмосфере и в космосе. М.: Мир, 1969. 285 с.
2. Pueshel R.F., Boering K.A., Verma S., Howard S.D., Ferry G.V., Goodman J., Allen D.A., Hamill P. Soot aerosol in the lower stratosphere: Pole-to-pole variability and contributions by aircraft // J. Geophys. Res. D. 1997. V. 102. P. 13,113–13,118.
3. Rietmeijer F.J.M. A model for tropical-extratropical transport of volcanic ash in the lower stratosphere // Geophys. Res. Lett. 1993. V. 20. P. 951–954.
4. Junge C.E., Chagnon C.W., Manson J.E. Stratospheric aerosols // J. Meteorol. 1961. V. 18. P. 81–108.
5. Turco R.P., Hamill P., Toon O.B., Whitten R.C., Kiang C. S. A one-dimensional model describing aerosol formation and evolution in the stratosphere // J. Atmos. Sci. 1979. V. 36. P. 699–736.
6. Toon O.B., Turco R.P., Whitten R. C., Hamill P. Implications of stratospheric aerosol measurements for models of aerosol formation and evolution // Geophys. Res. Lett. 1981. V. 8. P. 23–25.
7. Turco R.P., Toon O.B., Whitten R. C. Stratospheric aerosols: observation and theory // Rev. Geophys. Space Phys. 1982. V. 20. P. 233–279.
8. Cheremisin 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.
9. Preining O. Photophoresis // Aerosol Science. N.Y.: Academic Press, 1966. P. 111–135.
10. Kerker M., Cooke D.D. Photophoretic force on aerosol particles in the free - molecule regime // J. Opt. Soc. Amer. 1982. V. 72. № 9. P. 1267–1272.
11. 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 Mass Transfer. 2001. V. 44. P. 1649–1657.
12. Pueshel R.F., Verma S., Rohatschek H., Ferry G.V., Boiadjeva 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.
13. Rohatschek H. Levitation of mesospheric and stratospheric aerosols by gravito-photophoresis // J. Aerosol Sci. 1996. V. 27. № 3. P. 467–475.
14. Chernyak V., Beresnev S. Photophoresis of aerosol particles // J. Aerosol Sci. 1993. V. 24. № 7. P. 857–866.
15. Боголенов А.И., Суетин П.Е., Береснев С.А., Быстров Г.П., Черняк В.Г. Фотофорез модельных аэрозольных частиц // Теплофиз. высок. температур. 1996. Т. 34. № 5. С. 751–756.
16. 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.
17. *Mackowski D.W.* Photophoresis of aerosol particles in the free-molecular and slip-flow regimes // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1989. V. 32. № 5. P. 843–854.
  18. *Шифрин К.С., Зельманович И.Л.* Световое давление на капли воды // Оптика и спектроскопия. 1964. Т. 17. № 1. С. 113–118.
  19. *Фукс Н.А.* Механика аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 352 с.
  20. *Rosen M.H., Orr C.* The photophoretic force // *J. Colloid Sci.* 1964. V. 19. № 1. P. 50–60.
  21. *Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Смирнов В.В., Серова В.В., Штайн Р.* Аэрозоли Арктики – результаты десятилетних исследований // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 6–7. С. 551–576.
  22. *Аэрозоли и климат* / Под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 542 с.
  23. *Chýlek P., Leisins G.B., Videen G. et al.* Black carbon and absorption of solar radiation by clouds // *J. Geophys. Res. D*. 1996. V. 101. № 18. P. 23,365–23,371.
  24. *Таблицы физических величин: Справочник* / Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
  25. *Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент* / Под ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. М.: Энергоиздат, 1982. 512 с.
  26. *Зуев В.Е.* Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М.: Сов. радио, 1970. 496 с.

*S.A. Beresnev, F.D. Kovalev, L.B. Kochneva, V.A. Runkov, P.E. Suetin, A.A. Cheremisin.* **On the possibility of particle's photophoretic levitation in the stratosphere.**

The results of estimation of photophoretic levitation for particles of particular types of atmospheric aerosol in the stratosphere are presented. The gas-kinetic and electrodynamic aspects of the problem are analysed. The levitation conditions and altitudes for particles with known optical and thermal properties are discussed. Due to the decrease of effective density and thermal conductivity of real aerosol particles having loose but compact structure and absorbing solar radiation sufficiently well, the photophoretic forces became comparable with the forces of gravity. The photophoretic levitation appears possible for carbonaceous soot particles of a different type in the lower stratosphere at altitudes of 15–33 km.