

## ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 535.36; 551.3

### Фотофоретическое движение сажевых аэрозолей в поле коротковолнового солнечного излучения

С.А. Береснев<sup>1</sup>, Л.Б. Кочнева<sup>1</sup>, Т.Б. Журавлева<sup>2</sup>, К.М. Фирсов<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина  
620083, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>3</sup>Волгоградский государственный университет  
400062, г. Волгоград, пр. Университетский, 100

Поступила в редакцию 27.05.2011 г.

Представлены результаты теоретического анализа фотофоретического движения частиц сажи в поле солнечного излучения в условиях стационарной атмосферы. В уточненном радиационном блоке модели интегральные потоки солнечного излучения рассчитывались методом Монте-Карло в рамках приближения плоскопараллельной горизонтально-однородной молекулярно-аэрозольной атмосферы. Анализ полученных результатов вновь подтверждает возможность существенных фотофоретических проявлений для частиц сажевого аэрозоля в стратосфере: «солнечный» фотофорез может рассматриваться как эффективный механизм вертикального переноса поглощающих субмикронных частиц до высот средней стратосферы. Силы «солнечного» фотофореза могут конкурировать с силами тяжести до высот 30–35 км для частиц субмикронного и микронного размеров. С другой стороны, оценки вновь продемонстрировали малую эффективность радиометрического фотофореза для слабопоглощающих, плотных и сильнотеплопроводных частиц атмосферного аэрозоля.

*Ключевые слова:* аэрозоль, фотофорез, солнечное излучение, частицы сажи; aerosol, photophoresis, solar radiation, soot particles.

#### Введение

Возможность упорядоченного вертикального перемещения частиц определенных типов аэрозоля в стратосфере за счет действия фотофоретических сил обсуждается не одно десятилетие. Известно, что инверсный профиль температуры в стратосфере приводит к ее термической и механической устойчивости. Циркуляция воздушных масс в стратосфере существенно отличается от тропосферной циркуляции и в целом не определяется конвекцией и интенсивным турбулентным перемешиванием [1]. Это должно способствовать проявлению индивидуальных транспортных свойств частиц аэрозоля, в том числе и обусловленных действием радиометрических (фотофоретических) сил как в поле коротковолнового солнечного (далее — солнечного), так и в поле длинноволнового теплового излучения атмосферы. Однако до сих пор не существует единой точки зрения на потенциальные возможности и роль радиометрического фотофореза в переносе различных типов аэрозоля на стратосферных высотах.

Так, на основании известных результатов [2] достаточно долго превалировало мнение, что в сво-

бодномолекулярном режиме в поле падающего солнечного излучения (условия, характерные для аэрозоля стратосферы и мезосферы) фотофоретические силы не превышают нескольких процентов от силы тяжести. Это действительно справедливо для плотных, сильнотеплопроводных и слабо поглощающих излучение частиц определенных типов стратосферного аэрозоля (например, для частиц полярных стратосферных облаков, частиц слоя Юнге, ледяных частиц и др.). Именно такие выборочные оценки, проведенные в [2], и стали приниматься в дискуссиях как характеристики максимальных возможностей проявлений фотофоретических эффектов в стратосфере.

Данный вывод стимулировал исследователей на поиски новых, казалось бы более эффективных механизмов вертикального переноса частиц в поле излучения на больших высотах среди малоизученных (или просто гипотетических) явлений, в отличие от достаточно надежно исследованного теоретически и экспериментально радиометрического фотофореза. Например, в [3] для оценок потоков частиц сажи в стратосфере была использована модель вертикального переноса аэрозолей, основанная на предположении о возможном действии так называемого Δ-гравитофотофореза. Сущность этого явления заключается в возникновении новой, «аккомодационной» силы, эффективно действующей на сильнотеплопроводные и достаточно плотные частицы в поле излучения, для которых обычный радиометрический

\* Сергей Анатольевич Береснев (sergey.beresnev@usu.ru); Луиза Бариевна Кочнева (louisa.letfulova@usu.ru); Татьяна Борисовна Журавлева (ztb@iao.ru); Константин Михайлович Фирсов (fkm.volgu@mail.ru).

фотофорез пренебрежимо мал (детали данного явления обсуждаются в [4]).

Между тем оценки транспортных возможностей радиометрического фотофореза отнюдь нельзя считать завершенными. В частности, в [5] было показано, что отрицательный «солнечный» фотофорез может быть причиной вертикального движения против силы тяжести в стратосфере для хорошо поглощающих излучение и достаточно легких и слабостеплопроводных частиц сажи. Более того, оказалось, что и уходящее тепловое излучение Земли может обеспечить вертикальный подъем и даже левитацию сажевых частиц с определенными теплофизическими и оптическими характеристиками на высотах средней стратосферы. Согласно расчетам положительный «тепловой» фотофорез может приводить к вертикальному подъему более крупных частиц сажи, чем отрицательный «солнечный» фотофорез [6].

Итог первого этапа исследований атмосферного фотофореза был подведен в [7], где были даны оценки транспортных возможностей «солнечного» и «теплого» фотофореза частиц сажи, исходя из задания максимально возможных плотностей потоков (далее для краткости — потоков) солнечной и тепловой радиации. Однако данные оценки могут оказаться чересчур оптимистичными по сравнению с реальными значениями данных параметров. В связи с этим для уточнения характеристик «теплого» фотофореза в [8] помимо восходящего потока был учтен и поток нисходящего теплового излучения, что несколько изменило и уточнило отыскиваемые величины, но сохранило вывод о существенных возможностях «теплого» фотофореза в вертикальном переносе сажевых частиц в стратосфере вплоть до возможностей их левитации на определенных высотах.

В настоящей статье рассмотрен радиационный блок для описания фотофоретического движения частиц в поле солнечного излучения (используется модель переноса излучения для плоскопараллельной горизонтально-однородной молекулярно-аэрозольной атмосферы), а также приведены расчеты и дан анализ величин фотофоретических сил и возможных высот левитации частиц сажи на стратосферных высотах.

## Постановка задачи и определяемые величины

Рассмотрим сферическую частицу радиуса  $R_p$ , находящуюся на высоте  $z$  в поле плоской волны солнечного излучения. Частица характеризуется плотностью  $\rho_p$ , коэффициентом теплопроводности  $\lambda_p$  и комплексным показателем преломления  $m = n + ik$ , зависящим от длины волны падающего излучения  $\lambda$ . На высоте  $z$  давление воздуха  $p(z)$ , температура  $T(z)$ , соответствующий ей коэффициент теплопроводности газа  $\lambda_g(T)$ . Для определения  $p(z)$  и  $T(z)$  используются стандартные и справочные модели атмосферы, задающие вертикальные профили температуры, давления и плотности воздуха [9].

Вследствие поглощения солнечной радиации частица неоднородно нагревается, и на нее в разреженном газе действует фотофоретическая сила [10]. Минимальный размер аэрозольных частиц, подверженных радиометрическому фотофорезу, оценивается в 0,05–0,1 мкм даже в самых осложненных ситуациях (при этом характерные времена установления квазистационарного распределения температуры на поверхности частицы уже значительно меньше характерных времен ее броуновского вращения, а для описания распространения тепла в объеме частицы уже можно использовать закон Фурье [11]).

При рассмотрении сил, действующих на частицу в поле направленного излучения, можно обоснованно пренебречь силами продольного светового давления по сравнению с фотофоретическими силами [10]. Искомая фотофоретическая сила представляется следующим выражением:

$$F_{ph} = -\frac{2\pi}{3} \left( \frac{\pi M}{8RT(z)} \right)^{1/2} R_p^2 F(\text{Kn}, \Lambda) \times \int_0^{\infty} I_{\lambda}(z) J_{1\lambda}(\rho_{\lambda}, m_{\lambda}) d\lambda, \quad (1)$$

где  $M$  — молярная масса газа;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $F(\text{Kn}, \Lambda)$  — известная газокинетическая функция числа Кнудсена  $\text{Kn}$  и отношения теплопроводностей частицы и газа  $\Lambda$  [10];  $I_{\lambda}(z)$  — спектральный приток излучения на высоте  $z$ , который рассчитывается как разность нисходящих и восходящих потоков солнечной радиации на данной высоте;  $J_{1\lambda}(\rho_{\lambda}, m_{\lambda})$  — спектральный фактор асимметрии поглощения излучения, являющийся функцией дифракционного параметра  $\rho_{\lambda}$  и комплексного показателя преломления  $m_{\lambda}$  [12]. Таким образом, для корректного решения задачи необходимо получить достоверные и удобные в расчетах данные о зависимостях спектральных притоков излучения  $I_{\lambda}$  от высоты  $z$ , произвести расчет спектральных факторов асимметрии  $J_{1\lambda}$  и вычислить затем фотофоретическую силу (1), что представляется достаточно трудоемкой задачей, зачастую осложненной отсутствием необходимой информации о значениях  $m_{\lambda}$  для интересующих нас частиц. Разобьем полный спектральный диапазон солнечного излучения на достаточно небольшое число интервалов и заменим интеграл в (1) на аппроксимирующую его сумму:

$$\int_0^{\lambda_{\max}} I_{\lambda}(z) J_{1\lambda}(\rho_{\lambda}, m_{\lambda}) d\lambda \approx \sum_i^n I_{\lambda_i}(z) J_{1\lambda_i}(\rho_{\lambda_i}, m_{\lambda_i}) \Delta\lambda_i. \quad (2)$$

При надлежащем выборе характерных спектральных интервалов и корректной оценке необходимых в расчетах величин на этих интервалах можно ожидать достаточно обоснованных оценок силы  $F_{ph}(z)$  на различных высотах. В проведенных расчетах полагалось  $\lambda_{\max} = 5$  мкм.

Направление фотофоретической силы (ее действие вдоль или против распространения излучения) не зависит от условий газокинетического режима

и аккомодационных свойств поверхности частицы, а полностью определяется знаком фактора асимметрии поглощения излучения  $J_{1\lambda}$ . Достаточно подробный анализ данной оптической характеристики для однородных сферических частиц был проведен в работах [7, 12]. Анализ базируется на результатах стандартной теории Ми, эффективный алгоритм для соответствующих расчетов был впервые представлен в [13].

Расчеты [7, 12] показывают широкое разнообразие возможных зависимостей  $J_{1\lambda}$  от дифракционного параметра  $\rho_\lambda$  в поле коротковолнового излучения для частиц основных типов атмосферного аэрозоля. Однако, если рассматривать только так называемые сильно поглощающие излучение частицы (в первую очередь — это частицы сажи), то обнаруживаются общие характерные закономерности в поведении  $J_{1\lambda}$  (см., например, [12, рис. 1]). Для таких модельных частиц существует начальная область положительных значений  $J_{1\lambda}$  (которая порождает возможность отрицательного фотофореза — движения частиц против направления излучения), которая сменяется областью отрицательных значений  $J_{1\lambda}$  (такие частицы могут испытывать только положительный фотофорез в поле солнечного излучения).

На основании известных литературных данных о спектральных зависимостях комплексного показателя преломления  $m_\lambda$  для частиц сажи в коротковолновом диапазоне можно утверждать, что при проведении расчетов выбор значений в диапазоне  $n = 1,85 \div 2,0$  и  $k = 0,1 \div 0,5$  является удовлетворительным.

Помимо силы и скорости фотофореза, интерес представляют и другие величины, характеризующие атмосферные проявления фотофореза. В первую очередь — это отношение фотофоретической силы  $F_{ph}$  к силе тяжести  $F_{mg}$ , также равное отношению скорости фотофоретического движения  $U_{ph}$  к скорости гравитационной седиментации частицы  $U_{mg}$ :

$$\alpha(z) = F_{ph}(z)/F_{mg} = U_{ph}(z)/U_{mg}(z). \quad (3)$$

Возможна ситуация, когда на определенной высоте сила тяжести уравнивается противоположно направленной и равной по величине силой отрицательного «солнечного» фотофореза. Тогда можно говорить о левитации частиц в поле солнечного излучения в условиях стационарной атмосферы [5, 7, 12].

## Расчет интегральных потоков солнечной радиации

Интегральные потоки солнечной радиации рассчитывались методом Монте-Карло на основе подхода, изложенного в [14] в рамках плоскопараллельной горизонтально-однородной молекулярно-аэрозольной модели атмосферы.

Спектральный диапазон длин волн 0,2–5,0 мкм был разбит на 30 полос с возрастающим шагом от 0,05 в начале до 0,2 мкм в конце диапазона, что позволяет в том числе конструктивно использовать соотношение (2) для расчета фотофоретических харак-

теристик движения частиц. Спектральной изменчивостью оптических характеристик учитываемых типов атмосферного аэрозоля внутри каждой полосы пренебрегалось. Вертикальная стратификация аэрозольных оптических свойств соответствовала модели, рекомендованной World Climate Program (WCP) [15].

Для учета молекулярного поглощения функция пропускания представлялась в виде ряда экспонент (метод  $k$ -распределения). Расчеты были выполнены с использованием базы данных спектроскопической информации HITRAN-2000 для двух сезонно-широтных метеомоделей: экваториальная атмосфера и атмосфера лета умеренных широт. Вертикальные профили температуры, давления воздуха и концентраций атмосферных газов ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$ ,  $CH_4$  и др.) задавались согласно [9].

Предполагалось, что подстилающая поверхность отражает падающее излучение по закону Ламберта, причем альбедо  $A_S$  для модели лета умеренных широт предполагалось равным 0,0; 0,1; 0,2 и 0,4 без учета спектральной изменчивости. Зенитные углы Солнца (отсчитываемые от вертикала) предполагались равными 30, 45, 60 и 75° для модели лета умеренных широт, а для модели экваториальной атмосферы был дополнительно рассмотрен случай, когда зенитный угол Солнца равнялся 0°. Расчетные уровни по высоте варьировались от 0 до 100 км с шагом 1 км в интервале 0–20, 5 км — в интервале 20–50 и 10 км — в интервале 50–100 км. В пределах каждого слоя давление, температура, влажность, а также оптические характеристики атмосферного аэрозоля полагались постоянными.

На рис. 1 представлены расчеты интегрального по спектру притока солнечной радиации как функции высоты  $z$  для модели «средние широты — лето»

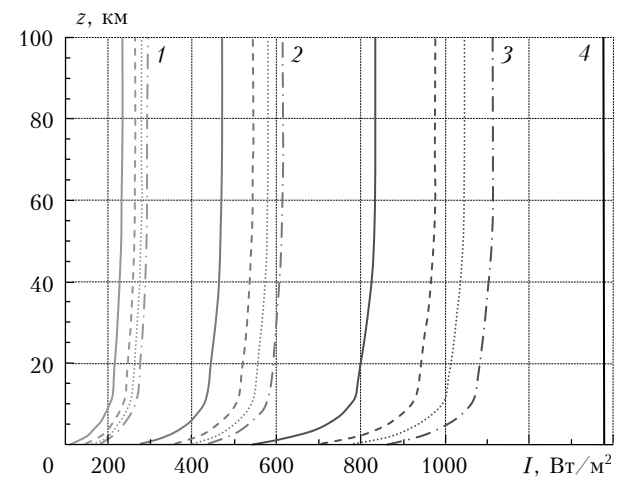


Рис. 1. Интегральный по спектру приток солнечной радиации как функция высоты  $z$  для модели атмосферы «средние широты — лето»: сплошные линии — альбедо поверхности  $A_S = 0,4$ ; штриховые — 0,2; пунктирные — 0,1; штрихпунктирные — 0,0; группа линий 1 — зенитный угол Солнца 75°; группа 2 — 60°; группа 3 — 30°; линия 4 —  $I = 1368 \text{ Вт/м}^2$  (как было принято в [5])

при различных зенитных углах Солнца и различных значениях альбедо подстилающей поверхности,

а на рис. 2 — аналогичные данные для модели экваториальной атмосферы. Видно, что увеличение зенитного угла Солнца уменьшает интегральный приток излучения. К уменьшению интегрального притока приводит и увеличение альbedo подстилающей поверхности  $A_S$ . На рис. 1 и 2 также представлен использованный в [5] постоянный высотный профиль притока солнечного излучения, принятый равным метеорологической постоянной  $I = 1368 \text{ Вт/м}^2$ .

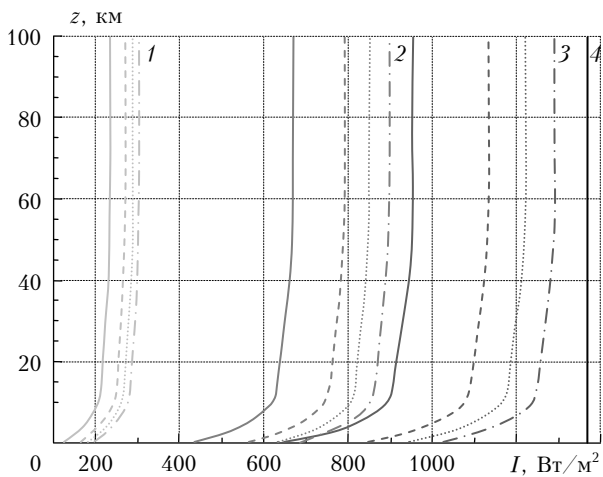


Рис. 2. Интегральный по спектру приток солнечного излучения как функция высоты  $z$  для модели экваториальной атмосферы: сплошные линии — альbedo поверхности  $A_S = 0,4$ ; штриховые —  $0,2$ ; пунктирные —  $0,1$ ; штрихпунктирные — спектрально-зависимое альbedo для океана [18]; группа линий 1 — зенитный угол Солнца  $75^\circ$ ; группа 2 —  $45^\circ$ ; группа 3 —  $0^\circ$ ; линия 4 —  $I = 1368 \text{ Вт/м}^2$  (как было принято в [5])

Видно, что рассчитанные нами высотные профили интегрального притока солнечного излучения могут быть существенно меньше этой величины. Так как фотофоретическая сила согласно (1) прямо пропорциональна интенсивности падающего излучения, то возможно ожидать некоторой коррекции результатов и выводов работы [5], где использовалось максимально возможное значение притока излучения.

### Характеристики фотофоретического движения сажевых аэрозолей

На рис. 3 представлены расчетные данные для отношения фотофоретической силы к силе тяжести для модельных частиц сажи в зависимости от высоты  $z$  для метеомодели «средние широты — лето». Параметры модельных частиц были выбраны из следующих соображений: оценка теплофизического параметра  $\Lambda = 5$  дает наилучшее согласие кинетической теории фотофореза [10] с лабораторными экспериментами [16] при эффективной плотности сажевых частиц  $\rho_p = 165 \text{ кг/м}^3$  и уже использовалась в [5]; значение  $\rho_p = 350 \text{ кг/м}^3$  рекомендовано в [17] для оценки эффективной плотности частиц сажи, эмитируемых авиадвигателями; значение  $m = 1,95 + 0,1i$

широко используется в расчетах оптических характеристик частиц сажи в коротковолновом диапазоне. В качестве примера на рис. 3 представлены результаты расчета только для частиц  $R_p = 0,2 \text{ мкм}$  (в [5] было показано, что частицы данного диапазона размеров демонстрируют максимальные фотофоретические эффекты в поле солнечного излучения).

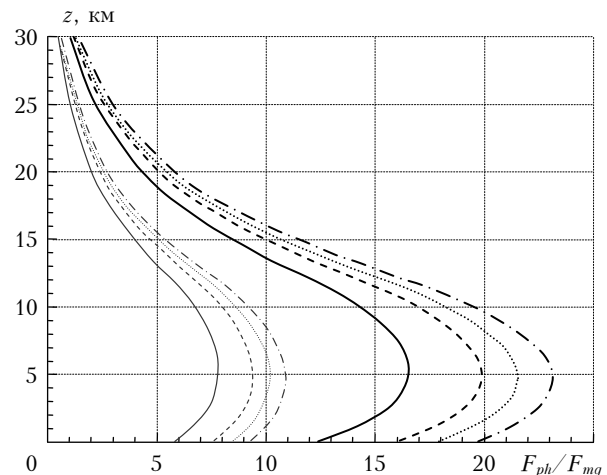


Рис. 3. Отношение фотофоретической силы к силе тяжести для частиц сажи с  $R_p = 0,2 \text{ мкм}$ ;  $m = 1,95 + 0,1i$ ;  $\Lambda = \lambda_p/\lambda_g = 5$  в зависимости от высоты  $z$  для модели атмосферы «средние широты — лето», зенитный угол Солнца  $30^\circ$ . Жирные линии —  $\rho_p = 165 \text{ кг/м}^3$ , тонкие —  $\rho_p = 350 \text{ кг/м}^3$ . Сплошные линии — альbedo поверхности  $A_S = 0,0$ ; штриховые —  $0,1$ ; пунктирные —  $0,2$ ; штрихпунктирные —  $0,4$

Максимум отношения сил на высотах около 5 км объясняется существованием известного газокинетического максимума фотофоретической силы при значении числа Кнудсена  $\text{Kn} \approx 0,30 \div 0,35$ , который реализуется для частиц данного размера на указанной высоте. Видно, что фотофоретическая сила может превышать силу тяжести в условиях стационарной атмосферы вплоть до высот 25–30 км. Увеличение плотности частиц (как и увеличение коэффициента теплопроводности) приводит к уменьшению отношения сил. Когда отношение сил больше единицы, то частицы сажи данного диапазона размеров при соответствующем интервале теплофизических параметров в стратосфере потенциально могут испытывать вертикальный подъем против силы тяжести, достигая высоты, где данное отношение становится равным единице.

Рис. 4 демонстрирует условия максимальной высоты подъема модельных частиц сажи при фиксированных значениях определяющих параметров.

Фактически это ожидаемые высоты левитации, на которых сила отрицательного «солнечного» фотофореза частиц уравнивается действием силы тяжести в условиях стационарной атмосферы. Видно, что левитировать могут частицы в диапазоне размеров 0,07–0,5 мкм, что объясняется протяженностью области отрицательного «солнечного» фотофореза, определяемой оптическими характеристиками модельных частиц сажи [5, 7, 12].

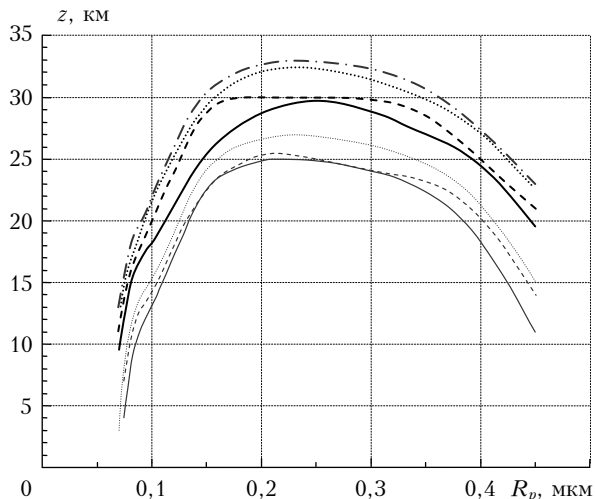


Рис. 4. Высоты возможной левитации частиц сажи с  $m = 1,95 + 0,1i$ ;  $\Lambda = \lambda_p/\lambda_g = 5$  для модели атмосферы «средние широты – лето», зенитный угол Солнца  $30^\circ$ . Жирные линии –  $\rho_p = 165 \text{ кг/м}^3$ , тонкие –  $\rho_p = 350 \text{ кг/м}^3$ . Сплошные линии – альbedo поверхности  $A_s = 0,4$ ; штриховые –  $0,2$ ; пунктирные –  $0,0$ ; штрихпунктирная линия  $I = 1368 \text{ Вт/м}^2$  (как было принято в [5])

Как и ожидалось, более плотные частицы сажи демонстрируют меньшие высоты левитации.

Увеличение значения альbedo подстилающей поверхности также уменьшает возможные высоты левитации. Самые малые и самые крупные частицы из возможного диапазона размеров демонстрируют и самые небольшие высоты левитации, а для частиц средних размеров характерно плато в интервале высот средней стратосферы 23–33 км. Отметим, что усовершенствование радиационного блока модели не привело к пересмотру основных выводов о заметных фотофоретических проявлениях для частиц сажи в стратосфере. Действительно, обоснованное уменьшение использованных в расчетах значений интегральных интенсивностей коротковолнового излучения по сравнению с [5] несколько понизило ожидаемые высоты левитации, но не сузило диапазон размеров левитирующих частиц и существенно не ограничило приемлемые интервалы теплофизических и оптических параметров частиц, которые целесообразно использовать в модельных расчетах.

### Заключение

Анализ полученных результатов на основе уточненного радиационного блока модели вновь подтверждает возможность существенных фотофоретических проявлений для частиц сажевого аэрозоля в стратосфере: «солнечный» фотофорез может рассматриваться как эффективный механизм вертикального переноса поглощающих субмикронных частиц до высот средней стратосферы. Силы «солнечного» фотофореза могут конкурировать с силами тяжести до высот 30–35 км для частиц субмикронного и микронного размера. С другой стороны, оценки вновь показали малую эффективность радиометрического фотофореза для слабопоглощающих, плотных и силь-

нотеплопроводных частиц атмосферного аэрозоля.

Представленные результаты были получены в рамках модели оптически однородных сферических частиц. Дальнейшее развитие теории фотофореза атмосферных сажевых аэрозолей обязательно должно учитывать их известную фракталоподобную структуру. К сожалению, на сегодняшний день не существует сколько-нибудь последовательной теории фотофореза фракталоподобных частиц при учете достаточно полного набора параметров.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 09-01-00649-а, 09-01-00474-а, 11-07-00660-а) и Минобрнауки России (ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», госконтракты № П1151, П1571 и 02.740.11.5198).

1. Brasseur G.P., Solomon S. Aeronomy of the middle atmosphere. Chemistry and physics of the stratosphere and mesosphere. Dordrecht: Springer, 2005. 3rd ed. 646 p.
2. Kerker M., Cooke D.D. Photophoretic force on aerosol particles in the free-molecule regime // J. Opt. Soc. Amer. 1982. V. 72, N 9. P. 1267–1272.
3. Pueschel 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 // Geophys. Res. D. 2000. V. 105, N 3. P. 3727–3736.
4. Береснев С.А., Суетин Д.В. О гипотезе гравито-фотофореза атмосферных аэрозолей и ее экспериментальной проверке // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 2. С. 131–139.
5. Береснев С.А., Ковалев Ф.Д., Кочнева Л.Б., Рунков В.А., Суетин П.Е., Черемисин А.А. О возможности фотофоретической левитации частиц в стратосфере // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16, № 1. С. 52–57.
6. Береснев С.А., Кочнева Л.Б., Суетин П.Е., Захаров В.И., Грибанов К.Г. Фотофорез атмосферных аэрозолей в поле теплового излучения Земли // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16, № 5–6. С. 470–477.
7. Кочнева Л.Б. Микрофизические оптические характеристики и фотофорез атмосферных аэрозолей: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Екатеринбург: Уральский гос. ун-т, 2007. 24 с.
8. Береснев С.А., Кочнева Л.Б., Захаров В.И., Грибанов К.Г. Фотофорез сажевых аэрозолей в поле теплового излучения Земли // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 7. С. 597–600.
9. Anderson G.P., Clough S.A., Kneizys F.X., Chetwynd J.H., Shettle E.P. AFGL atmospheric constituent profiles (0–120 km) / Air Force Geophysics Laboratory (USA): AFGL-TR-86-0110, Environment research paper N 954. 1986. 43 p.
10. Beresnev S., Chernyak V., Fomyagin G. Photophoresis of a spherical particle in a rarefied gas // Phys. Fluids. A. 1993. V. 5, N 8. P. 2043–2052.
11. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 352 с.
12. Береснев С.А., Кочнева Л.Б. Фактор асимметрии поглощения излучения и фотофорез аэрозолей // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16, № 2. С. 134–141.
13. Mackowski D.W. Photophoresis of aerosol particles in the free molecular and slip-flow regimes // Int. J. Heat Mass Transfer. 1989. V. 32, N 5. P. 843–854.
14. Журавлева Т.Б., Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Фирсов К.М. Моделирование прямого радиационного форсинга аэрозоля для типичных летних условий Сибири. Часть 1: Метод расчета и выбор входных параметров

- // Оптика атмосф. и океана. 2009, Т. 22, № 2. С. 163–172.
15. *A preliminary cloudless standart atmosphere for radiation computation.* World Climate Research Programme. WCP-112, WMO/TD N 24. 1986. 60 p.
16. *Rosen M.H., Orr C.* The photophoretic force // *J. Colloid Sci.* 1964. V. 19, N 1. P. 50–60.
17. *Popovicheva O., Kireeva E., Persiantseva N., Khokhlova T., Shonija N., Tishkova V., Demirdjian B.* Effect of soot on immersion freezing of water and possible atmospheric implications // *Atmos. Res.* 2008. V. 90, N 2–4. P. 326–337.
18. *Hook S.J.* ASTER Spectral Library: Johns Hopkins University (JHU) spectral library; Jet Propulsion Laboratory (JPL) spectral library; The United States Geological Survey (USGS-Reston) spectral library. 1998. Dedicated CD-ROM. Version 1.2. (электронный ресурс <http://speclib.jpl.nasa.gov/>).

*S.A. Beresnev, L.B. Kochneva, T.B. Zhuravleva, K.M. Firsov.* **Photophoretic motion of soot aerosol in the shortwave solar radiation field.**

The results of theoretical analysis of photophoretic motion of soot particles in the shortwave solar radiation field for stationary atmosphere are presented. In the updated radiating block of the model the integrated fluxes of solar radiation were calculated by the Monte Carlo method with approximation of a plane-parallel, horizontal-homogeneous molecular-aerosol atmosphere. The analysis of the received results confirms again an opportunity the essential photophoretic effects for soot aerosol particles in stratosphere: the «sun» photophoresis can be considered as the effective mechanism of vertical transport of well-absorbing sub-micrometer particles up to heights of the middle stratosphere. The forces of «sun» photophoresis can compete to gravities up to heights 30–35 km for particles of sub-micrometer and micrometer sizes. On other hand, the estimations have shown again the small efficiency of radiometric photophoresis for weakly-absorbing, dense and high-conducting particles of atmospheric aerosol.