

Фотофорез сажевых аэрозолей в поле теплового излучения Земли

С.А. Береснев, Л.Б. Кочнева, В.И. Захаров, К.Г. Грибанов*

Уральский государственный университет им. А.М. Горького
620083, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51

Поступила в редакцию 4.02.2011 г.

Представлены результаты теоретического анализа фотофоретического движения сажевых частиц в поле теплового излучения Земли в условиях стационарной атмосферы. В расчетах учтены восходящий и нисходящий потоки теплового излучения. Показано, что положительный «тепловой» фотофорез может потенциально являться достаточно эффективным механизмом вертикального переноса частиц сажи микронного размера на высотах стратосферы.

Ключевые слова: аэрозоль, фотофорез, тепловое излучение, частицы сажи; aerosol, photophoresis, thermal radiation, soot particles.

В предыдущей работе авторов [1] был впервые проанализирован новый тип возможного фотофоретического движения атмосферных аэрозолей: фотофорез частиц в поле теплового излучения Земли («тепловой» фотофорез). Было показано, что достаточно легкие и слабо теплопроводные, но в то же время хорошо поглощающие излучение в ИК-диапазоне частицы определенного диапазона размеров (например, частицы сажи) могут испытывать вертикальное перемещение против силы тяжести и левитировать на определенных высотах в стратосфере. В [1] в качестве первого приближения был учтен только поток восходящего теплового излучения, который и являлся движущей силой перемещения частиц. Известно также, что и нисходящие потоки длинноволнового излучения в тропосфере и нижней стратосфере достаточно велики (см., например, [2]), а их учет в модели может привести как к количественным, так и к качественным изменениям в оценках и выводах. В настоящей статье обобщаются ранее полученные результаты [1] при учете в модели фотофоретического движения частиц сажи нисходящего потока длинноволновой радиации.

Постановка задачи и определяемые величины

Рассмотрим сферическую частицу радиуса R_p , находящуюся на высоте z в поле плоской волны теплового электромагнитного излучения, характеризуемого интегральной интенсивностью (модулем век-

тора суммарной плотности потока излучения) I_{th} размерностью Вт/м². Абсолютная величина I_{th} определяется алгебраической суммой $I_{th} = I_{th}^{up} + I_{th}^{down}$, где восходящему потоку (*up*) приписывается знак «+», а нисходящему (*down*) — знак «-». Частица характеризуется плотностью ρ_p , коэффициентом теплопроводности λ_p и комплексным показателем преломления $m = n + ik$, зависящим от длины волны падающего излучения λ . На высоте z давление воздуха обозначим $p(z)$, температуру — $T(z)$, 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 (например, [3]).

Вследствие поглощения односторонне направленных потоков восходящего и нисходящего теплового излучения частица неоднородно нагревается, и на нее в разреженном газе действует суммарная фотофоретическая сила [4]. Ее направление определяется только оптическими характеристиками частицы, но не зависит от условий газокинетического режима и аккомодационных свойств поверхности [4]. Использованное свойство линейности «восходящих» и «нисходящих» фотофоретических сил обосновывается принципом суперпозиции соответствующих электромагнитных полей внутри частицы, а также линейностью самой постановки задачи о фотофорезе частиц в газах [4]. Минимальный размер аэрозольных частиц, эффективно подверженных радиометрическому фотофорезу, оценивается 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 можно использовать закон Фурье).

* Сергей Анатольевич Береснев (sergey.beresnev@usu.ru); Луиза Бариевна Кочнева (louisa.letfulova@usu.ru); Вячеслав Иосифович Захаров (v.zakharov@remotesensing.ru); Константин Геннадьевич Грибанов (kgribanov@remotesensing.ru).

При рассмотрении сил, действующих на частицу в поле излучения, обоснованно пренебрегается силами продольного светового давления по сравнению с фотофоретическими силами [4]. Отметим, что радиометрический фотофорез аэрозолей (в частности, частиц сажи) в поле ИК-излучения достаточно давно и подробно исследовался экспериментально в лабораторных условиях (см., например, [5, 6]).

Искомая фотофоретическая сила представляется следующим выражением:

$$F_{ph}(z) = -\frac{2\pi}{3} \left(\frac{\pi M}{8RT(z)} \right)^{\frac{1}{2}} R_p^2 F(Kn, \Lambda) J_1(\rho, m) \int_0^{\infty} I_{\lambda}(z) d\lambda,$$

где M – молярная масса газа; R – универсальная газовая постоянная; $F(Kn, \Lambda)$ – известная газокинетическая функция числа Kn и отношения теплопроводностей частицы и газа Λ [4]; $I_{\lambda}(z)$ – спектральная интенсивность излучения на высоте z ; $J_1(\rho, m)$ – интегральный фактор асимметрии поглощения теплового излучения, являющийся функцией дифракционного параметра ρ и комплексного показателя преломления m [7]. Анализ фактора $J_1(\rho, m)$ для частиц сажи в длинноволновом диапазоне излучения показал, что в силу малой его изменчивости при варьировании действительной и мнимой частей комплексного показателя преломления m при фиксированном значении ρ в расчетах можно обоснованно пользоваться именно интегральным, а не спектральным фактором асимметрии поглощения излучения [1, 7]. Таким образом, основной неизвестной характеристикой в задаче является интегральная интенсивность теплового излучения на высоте z

$$I_{th} = \int_0^{\infty} (I_{\lambda}^{up}(z) + I_{\lambda}^{down}(z)) d\lambda.$$

Помимо абсолютных значений фотофоретической силы $F_{ph}(z)$, скорости фотофоретического движения и полной скорости вертикального перемещения частицы интерес представляют отношение фотофоретической силы к силе тяжести на высоте z $\alpha = F_{ph}(z)/F_{mg}$ и характерные высоты (высоты левитации частиц в стационарной атмосфере), где эти силы могут уравновешивать друг друга.

Расчет высотных профилей интенсивностей теплового излучения

Благодаря поглощению длинноволнового атмосферного излучения облаками, водяным паром, другими радиационно-активными газами и аэрозолем формируются характерные для различных широт и сезонов вертикальные профили интенсивностей тепловой радиации. Особенностью потоков теплового излучения является малая величина их суточных вариаций в отличие от потоков коротковолновой солнечной радиации, достигающих своего максимума в полдень и равных нулю ночью. Задавая температуру поверхности Земли, концентрацию парниковых газов и профиль температуры в атмосфере,

возможно провести расчеты спектральных, а затем и интегральных интенсивностей восходящего I_{th}^{up} и нисходящего I_{th}^{down} теплового излучения на различных высотах, решая уравнение переноса инфракрасной радиации [8].

Спектральный коэффициент поглощения атмосферными компонентами в расчетах включал в себя следующие слагаемые:

- коэффициент поглощения газовыми компонентами в приближении локального термодинамического равновесия по методу суммирования по спектральным линиям (*line-by-line*) с использованием параметров базы данных HITRAN-2004;
- коэффициент поглощения аэрозольными компонентами, вычисляемый с помощью модельных представлений;
- коэффициент континуального поглощения водяным паром, вычисляемый с помощью принятой параметризации.

Расчеты вертикальных профилей интегральных интенсивностей теплового излучения при использовании справочных широтно-сезонных моделей атмосферы [3] проводились с помощью пакета прикладных программ FIRE-ARMS [9] в интервале длин волн 3,33–100 мкм, результаты представлены на рис. 1.

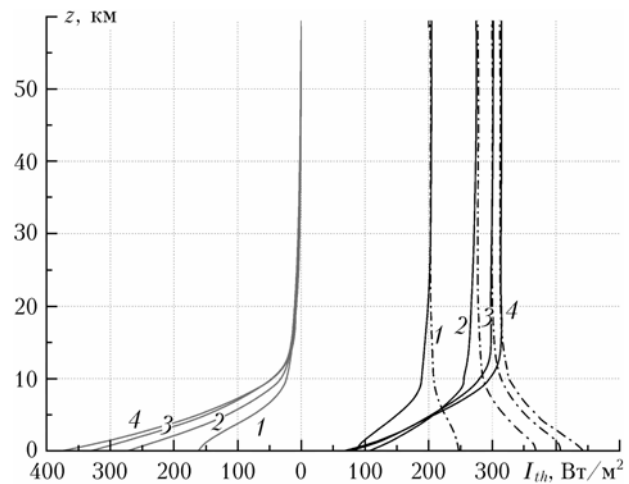


Рис. 1. Проинтегрированные по длинам волн в интервале 3,33–100 мкм интегральные интенсивности теплового излучения как функции высоты для различных справочных широтно-сезонных моделей атмосферы: серые линии – нисходящее излучение I_{th}^{down} , штрихпунктирные – восходящее излучение I_{th}^{up} , черные сплошные линии – суммарное излучение I_{th} ; 1 – Субарктика (зима), 2 – стандартная атмосфера США, 3 – средние широты (лето), 4 – тропическая атмосфера

Значение излучательной способности земной поверхности было принято равным 0,95 [2]. Хотя вычисления формально выполнены для безоблачной плоскопараллельной атмосферы, усредненное влияние облачности учитывается косвенно при использовании среднестатистических модельных профилей температуры и влажности, являющихся, в свою очередь, усредненными характеристиками многочисленных натурных измерений.

Основные результаты

Из рис. 1 видно, что интенсивности нисходящего теплового излучения весьма существенны в тропосфере для всех рассмотренных широтно-сезонных моделей атмосферы, причем по абсолютной величине они сопоставимы с интенсивностями восходящего излучения. По этой причине суммарные интенсивности теплового излучения в тропосфере и нижней стратосфере демонстрируют противоположную высотную зависимость по сравнению с интенсивностями только восходящего излучения, учтенными в [1]: они монотонно возрастают до высот примерно 20 км, а выше суммарные интенсивности практически полностью определяются только восходящим тепловым излучением. Например, для модели стандартной атмосферы США на высоте 20 км интенсивности восходящего и суммарного излучения разнятся примерно на 4%, а на высоте 60 км — на 0,8%.

На рис. 2 представлены расчеты отношения фотофоретической силы к силе тяжести на разных высотах для модельных частиц сажи при использовании различных справочных широтно-сезонных моделей атмосферы.

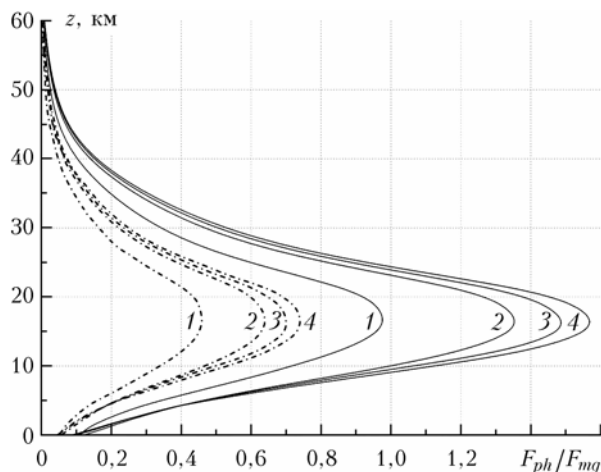


Рис. 2. Отношение фотофоретической силы к силе тяжести на разных высотах для модельных частиц сажи с $R_p = 1,5$ мкм, $\Lambda = 5$ и $m = 2,42 + 1,02i$ для различных справочных широтно-сезонных моделей атмосферы: штрихпунктирные линии — $\rho_p = 350$ кг/м³, черные линии — $\rho_p = 165$ кг/м³; 1 — Субарктика (зима), 2 — стандартная атмосфера США, 3 — средние широты (лето), 4 — тропическая атмосфера

Параметры модельных частиц были выбраны из следующих соображений: оценка теплофизического параметра $\Lambda = 5$ дает наилучшее согласие кинетической теории фотофореза [4] с лабораторными экспериментами [10] при эффективной плотности сажевых частиц $\rho_p = 165$ кг/м³ и уже использовалась в [11]; значение $\rho_p = 350$ кг/м³ рекомендовано в [11] для оценки эффективной плотности частиц сажи, эмитируемых авиадвигателями; значение $m = 2,42 + 1,02i$ является широко используемым в расчетах оптических характеристик частиц сажи в ИК-диапазоне [1, 7].

Как пример проведенных расчетов на рис. 2 представлены результаты только для частиц размером $R_p = 1,5$ мкм (в [1] было показано, что частицы данного диапазона размеров демонстрируют максимальные фотофоретические эффекты в поле восходящего теплового излучения). Видно, что отношение сил может достигать значительных величин на высотах 15–20 км, причем для более легких частиц ($\rho_p = 165$ кг/м³) оно превышает единицу для всех рассмотренных широтно-сезонных моделей, за исключением модели арктической атмосферы. Это означает, что довольно крупные (но одновременно с достаточно малой эффективной плотностью) частицы сажи в стратосфере потенциально могут испытывать вертикальный подъем против силы тяжести, стартовав с высоты, где отношение сил равно единице (снизу), и достигнув высоты, где это отношение вновь равно единице (но уже сверху, рис. 2).

Рис. 3 демонстрирует условия максимальной высоты подъема модельных частиц сажи с вышеуказанными параметрами — ожидаемые высоты левитации, на которых сила положительного «теплового» фотофореза частиц уравнивается действием силы тяжести в условиях стационарной атмосферы.

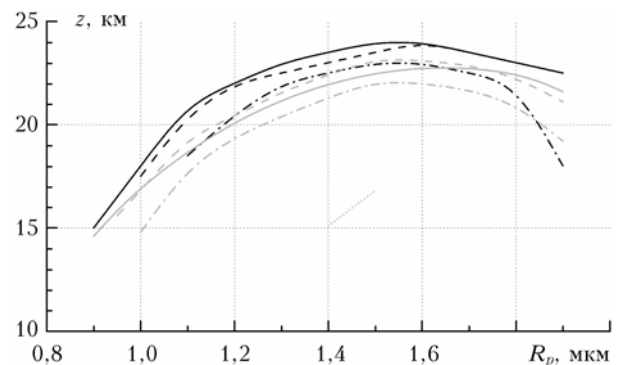


Рис. 3. Предсказываемые высоты левитации для частиц сажи с $\rho_p = 165$ кг/м³, $\Lambda = 5$ и $m = 2,42 + 1,02i$ для различных справочных широтно-сезонных моделей атмосферы: сплошные линии — тропическая атмосфера, пунктир — средние широты (лето), штрихпунктир — стандартная атмосфера США, короткий пунктир — Субарктика (зима), серые линии — учет только восходящего теплового излучения, черные линии — учет восходящего и нисходящего излучения

Расчеты проведены с учетом как восходящего теплового излучения, так и суммарного (восходящего и нисходящего) излучения. Как и в работе [1], обнаружено заметное проявление положительного фотофореза для модельных частиц сажи определенных свойств в поле теплового излучения. Ожидаемые высоты левитации частиц для двух вариантов учета потоков тепловой радиации лежат в диапазоне 15–25 км и несколько различаются. Например, для модели стандартной атмосферы США это различие колеблется от 0,3 до 3,7 км (относительное различие составляет от 1 до 20%), что говорит о весьма высокой чувствительности процедуры оценки высот левитации к малым изменениям интенсивности теплового излучения. Фотофоретические эффекты наиболее

чувствительны к условиям зимней субарктической атмосферы, где интенсивности теплового излучения минимальны. Отметим, что в варианте учета суммарного излучения для этой модели фотофоретическая сила, действующая на рассмотренные частицы, уже не может превышать силу тяжести, а их левитация становится невозможной.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 09-01-00649 и 09-01-00474) и Минобрнауки России (госконтракты № П1151 и П1571).

1. 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.
2. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 474 с.
3. 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.
4. Beresnev S., Chernyak V., Fomyagin G. Photophoresis of a spherical particle in a rarefied gas // Phys. Fluids. 1993. V. 5A, N 8. P. 2043–2052.
5. Pluchino A.B. Radiometric levitation of spherical carbon aerosol particles using a Nd:YAG laser // Appl. Opt. 1983. V. 22, N 12. P. 1861–1866.
6. Karasev V.V., Ivanova N.A., Sadykova A.R., Kukhareva N., Baklanov A.M., Onischuk A.A., Kovalev F.D., Beresnev S.A. Formation of charged soot aggregates by combustion and pyrolysis: charge distribution and photophoresis // J. Aerosol Sci. 2004. V. 35, N 3. P. 363–381.
7. Береснев С.А., Кочнева Л.Б. Фактор асимметрии поглощения излучения и фотофорез аэрозолей // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16, № 2. С. 134–141.
8. Кондратев К.Я., Тимофеев Ю.М. Термическое зондирование атмосферы со спутников. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 280 с.
9. Грибанов К.Г., Захаров В.И., Ташкун С.А. Пакет программ FIRE-ARMS и его применение в задачах пассивного ИК-зондирования атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 1999. Т. 12, № 4. С. 372–375.
10. Rosen M.H., Orr C. The photophoretic force // J. Colloid Sci. 1964. V. 19, N 1. P. 50–60.
11. 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.

S.A. Beresnev, L.B. Kochneva, V.I. Zakharov, K.G. Gribanov. Photophoresis of soot aerosol in the Earth' thermal radiation field.

The results of theoretical analysis of photophoretic motion of soot particles in the field of the Earth' thermal radiation in a stationary atmosphere are presented. In calculations the up- and downfluxes of thermal radiation are taken into account. It is shown that positive "thermal" photophoresis potentially can be the effective mechanism of vertical transport for micron-sized soot particles at stratospheric altitudes.