

УДК 535.36; 551.3

## Фотофорез фракталоподобных агрегатов сажи: микрофизическая модель, сравнение с экспериментом и возможные атмосферные проявления

С.А. Береснев, М.С. Васильева, В.И. Грязин, Л.Б. Кочнева\*

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
Институт естественных наук и математики  
620063, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51*

Поступила в редакцию 22.02.2017 г.

Представлена микрофизическая модель фотофоретического движения агрегатов сажи, учитывающая их фрактальную структуру. Проведено сопоставление с известными экспериментальными данными, обнаружено их хорошее качественное и количественное согласие. Приведены результаты расчетов характеристик движения фракталоподобных агрегатов сажи в поле атмосферной радиации. Показано, что для модели фракталоподобных частиц фотофоретические эффекты для сажевого аэрозоля в условиях стационарной атмосферы наиболее существенно проявляются на высотах верхней тропосферы – средней стратосферы.

*Ключевые слова:* сажевый аэрозоль, фотофорез, фракталоподобные частицы, стратосфера; soot aerosol, photophoresis, fractal-like particles, stratosphere.

### Введение

Фотофорез аэрозолей (движение частиц в поле направленного излучения) – достаточно распространенное физическое явление, имеющее как фундаментальную, так и прикладную значимость. К настоящему времени наиболее детально изучены характеристики так называемого продольного фотофореза, когда частицы движутся прямолинейно либо по направлению излучения (положительный фотофорез), либо против (отрицательный фотофорез). При теоретическом анализе аэрозольные частицы, как правило, полагаются сферическими и однородными. В частности, в [1] представлена газокинетическая теория фотофореза для модели сферических частиц, позволяющая количественно описать закономерности фотофоретического движения во всем диапазоне давлений газа (числа Кнудсена). С учетом расчетов по теории Ми фотофоретического фактора асимметрии [2] становится возможным полностью замкнуть проблему и вычислить абсолютные значения силы и скорости фотофореза для сферических однородных частиц во всем диапазоне изменения определяющих параметров задачи.

Теория продольного фотофореза [1, 2] была тщательно проверена в экспериментах с модельными макроскопическими частицами [3] и показала хорошее качественное и количественное соответствие.

\* Сергей Анатольевич Береснев (sergey.beresnev@urfu.ru); Мария Сергеевна Васильева (mary\_ru@mail.ru); Виктор Иванович Грязин (gryazin.victor@mail.ru); Луиза Бариевна Кочнева (luiza.kochneva@urfu.ru).

Эксперименты с реальными аэрозолями, в которых частицы специально подбирались сферическими или, в худшем случае, изометрическими, также демонстрируют вполне удовлетворительное согласие с разработанной теорией (см. обсуждение в [1]).

Наиболее интенсивно фотофоретические эффекты демонстрируют хорошо поглощающие излучение легкие и достаточно слабеплопроводные частицы сажи. Как правило, сажевые аэрозоли в атмосфере являются сложными агрегатами первичных частиц, имеющими выраженные фрактальные характеристики. Экспериментальные наблюдения фотофореза сажевых агрегатов описаны во многих публикациях, однако эксперименты, допускающие количественное сопоставление с теорией, фактически отсутствуют по причине недостаточной «метрологической аттестации» используемых частиц. Редким исключением являются эксперименты [4], которые позволяют наметить пути разработки адекватной микрофизической модели для фракталоподобных частиц, сравнить теорию и эксперимент и в дальнейшем использовать данную модель для оценок возможных проявлений фотофореза сажевого аэрозоля в атмосфере.

Ранее авторами анализировались характеристики фотофоретического движения углеродосодержащего аэрозоля в стратосфере в поле коротковолнового солнечного и длинноволнового теплового излучения для модели однородных сферических частиц (например, [5, 6]). Расчеты показали высокую транспортную эффективность фотофореза в стратосфере и, как следствие, возможную локализацию частиц на определенных высотах под его воздействием. Очевидно, что эти результаты должны быть сопоставлены

с данными для новой микрофизической модели, более адекватно учитывающей морфологические свойства реальных агрегатов сажи.

Целями данной работы являются разработка новой микрофизической модели, базирующейся на результатах экспериментов [4] и описывающей фотофоретическое движение фракталоподобных агрегатов сажи, и анализ транспортных характеристик фотофореза в поле атмосферной радиации на стратосферных высотах.

## Разработка микрофизической модели на основе экспериментальных данных

В работе [4] представлены результаты измерения скоростей фотофоретического движения агрегатов сажи субмикронных и микронных размеров. Фракталоподобные частицы (ФПЧ) агрегатов сажи были получены путем термического разложения бензола в проточном реакторе при атмосферном давлении. Были проанализированы морфология и дисперсный состав полученных ФПЧ. Они представляли собой агрегаты, состоящие из первичных частиц-сферул с характерными диаметрами в диапазоне  $40 \div 200$  нм. Оцененная фрактальная размерность агрегатов не зависела от скорости газового потока на входе в проточный реактор и составляла  $D_f = 1,80$  для всего исследованного диапазона скоростей входных потоков. С использованием метода видеомикроскопии в оптической аэрозольной кювете было исследовано движение сажевых агрегатов в поле одностороннего излучения He-Ne-лазера с длиной волны  $0,68$  мкм; при этом агрегаты демонстрировали устойчивый продольный положительный фотофорез. Для них были определены как фотофоретическая скорость, так и эквивалентный радиус (радиус подвижности  $R_m$ ); причем для малых частиц  $R_m$  определялся по броуновскому движению агрегатов, а для крупных — по скорости гравитационной седиментации. Газом-носителем в проточном реакторе являлся сухой азот при давлении  $1$  атм и  $T = 300$  К.

Для дальнейшего анализа будут использованы данные только для малых агрегатов ( $0,12 < R_m < 0,41$  мкм), радиусы подвижности которых были определены из характеристик броуновского движения; для более крупных агрегатов при определении  $R_m$  в процессе гравитационной седиментации возможно некоторое увеличение фрактальной размерности из-за реструктуризации ФПЧ в сдвиговом потоке [7]. По этой причине используемое в дальнейшем постоянное значение фрактальной размерности  $D_f = 1,80$  (оцененное независимо от способа определения радиуса подвижности  $R_m$ ) корректно только для малых агрегатов.

Измеренная фотофоретическая скорость ФПЧ в зависимости от их радиуса подвижности представлена на рис. 1. Здесь же приведены результаты теории для однородных сфер [1, 2] при разной относительной теплопроводности частиц  $\Lambda = \lambda_p/\lambda_g$  ( $\lambda_p$  и  $\lambda_g$  — коэффициенты теплопроводности частицы и газа соответственно) и оптимальных значениях других определяющих параметров проблемы ( $I =$

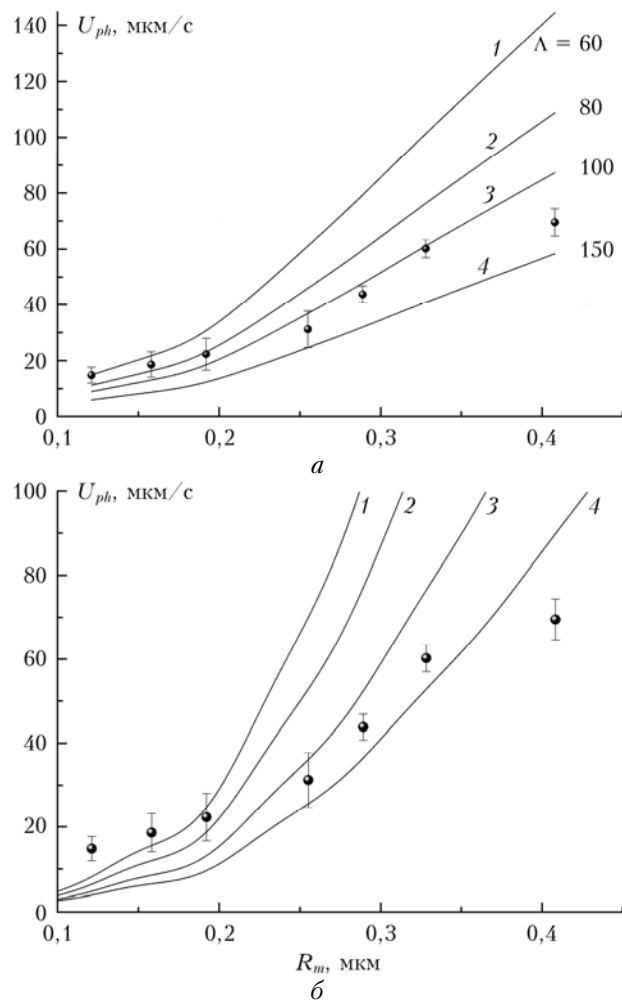


Рис. 1. Фотофоретическая скорость ФПЧ, измеренная в эксперименте [4] (черные кружки) в зависимости от радиуса подвижности в сравнении с теоретическими расчетами: *a* — для однородных сфер и  $\Lambda = 60$  (1), 80 (2), 100 (3) и 150 (4); *б* — для фракталоподобных частиц  $R_a = 15$  (1), 20 (2), 30 (3), 40 (4).  $D_f = 1,80$ ;  $\lambda_a = 80$  Вт/мК. Индекс *a* характеризует первичные частицы-сферулы

$= 2,5$  Вт/см<sup>2</sup>,  $m = 1,764 + 0,570i$ ) [8]. На первый взгляд представляется, что теория для сферических однородных частиц вполне успешно объясняет эксперимент и необходимо просто удачно подобрать значение коэффициента теплопроводности сажевого агрегата. С другой стороны, можно попытаться рассчитать данную характеристику на основе микрофизической модели процесса, учитывающей фрактальную структуру агрегатов.

Предполагая, что хорошее качественное согласие теории и эксперимента не является случайным, приходим к выводу, что функциональная зависимость фотофоретической скорости от размера частиц в [1] является верной и для фракталоподобных агрегатов, однако при этом необходимо правильно истолковать определяющие параметры и корректно разъяснить их предлагаемые трактовки [8]:

$$U_{ph}(Kn) = -\frac{\pi}{2(8 + \pi)} \frac{IJ_1}{\rho_g} \Phi(Kn, \Lambda),$$

где  $I$  – интенсивность излучения;  $J_1$  – фотофоретический фактор асимметрии [2];  $p_g$  – давление газа;  $\Phi(\text{Kn}, \Lambda)$  – рассчитанная в [1] газокинетическая функция числа Кнудсена  $\text{Kn} = l_g/R_m$  и относительной теплопроводности частицы и газа  $\Lambda$ . Здесь  $l_g$  – средняя длина свободного пробега молекул газа.

Для характеристики размера частиц в экспериментах [4] был использован радиус подвижности  $R_m$ , который удобен для описания несферических частиц и, наряду с радиусом гирации  $R_g$ , является определяющим в динамике фракталоподобных частиц [9]. Также было показано [10], что для оценок комплексного показателя преломления частиц  $m$  в расчетах фактора асимметрии  $J_1$   $m = 1,764 + 0,570i$  – оптимальный выбор для длины волны излучения He–Ne-лазера  $\lambda = 0,68$  мкм. Данное значение соответствует черной саже (black carbon) и удовлетворяет соотношениям Крамерса–Кронига, что выгодно отличает его от других (обычно эмпирических) оценок, известных из литературы. Дифракционный параметр  $\rho = 2\pi R/\lambda$  в расчетах  $J_1$  по теории Ми [2] вычисляется через «оптический» радиус частиц, который с приемлемой точностью можно полагать совпадающим с радиусом подвижности [9], т.е.  $R \approx R_m$ . Поглощение излучения в агрегате происходит посредством однородного по объему поглощения отдельными первичными частицами с  $R_a \ll \lambda$  (рэлеевские частицы) без их существенного взаимного влияния; полное сечение поглощения агрегата определяется элементарными актами поглощения сферулами с учетом эффектов их геометрического перекрытия (затенения). Для сферул – микрокристаллических агрегатов углерода – значение  $m$  такое же, как для черной сажи, что является вполне оправданным. Таким образом, фракталоподобный агрегат поглощает падающее одностороннее излучение неоднородно, что приводит к неоднородному распределению температуры по агрегату, а значит, к возникновению фотофоретической силы.

В модели однородных сфер эффективная теплопроводность частиц постоянна и не зависит от их размера. Для модели фракталоподобных частиц такое предположение уже неприемлемо. Авторы проверили ряд оценок эффективной теплопроводности агрегатов, трактуемых как эквивалентные сферы и состоящих из смеси первичных частиц и газовых пустот, на основе стандартных методик «эффективных средних» по Бруггеману, Максвелл–Гарнетту и др. (см., например, [11]). Ни одна из этих методик не привела к удовлетворительному и физически понятному результату. Причина заключается в базовых предположениях, принятых в этих методиках: считается, что включения-примеси (сферулы либо пустоты) достаточно равномерно распределены в объеме частицы по определенному статистическому закону [11]. Однако для ФПЧ это не так: плотность агрегата падает по степенному закону от центра к периферии эквивалентной сферы с радиусом гирации  $R_g$ . Кроме того, на величину теплопроводности агрегата должны влиять степень совершенства термического контакта между сферулами и целый ряд других факторов. Теорией, корректно учитывающей

фрактальную морфологию агрегата и его структурные особенности, является [12]. В ней фракталоподобный агрегат, состоящий из сферул «костяка» (черные сферы) и «тупиковых» сферул (серые сферы), помещен в эквивалентную сферу с радиусом гирации  $R_g$  (рис. 2). Первый уровень «гомогенизации» агрегата в модели [12] заключается в выделении «тупиковых» сферул и нахождении эффективной теплопроводности  $\lambda_{de}$  сферы, состоящей из газа и «тупиковых» сферул, равномерно распределенных в объеме эквивалентной сферы по методу эффективных средних Бруггемана. Затем «костяк» помещается в сферу радиуса  $R_g$  и по алгоритму, описанному в [13], находится эффективная теплопроводность  $\lambda_{eff}$  полной частицы (второй уровень «гомогенизации»), после чего определяется величина  $\Lambda = \lambda_{eff}/\lambda_g$ . Эта методика требует задания фрактальной размерности агрегата  $D_f$ , радиуса первичных частиц-сферул  $R_a$  (они полагаются монодисперсными), их теплопроводности  $\lambda_a$  и теплопроводности дисперсионной фазы (газа)  $\lambda_g$ .

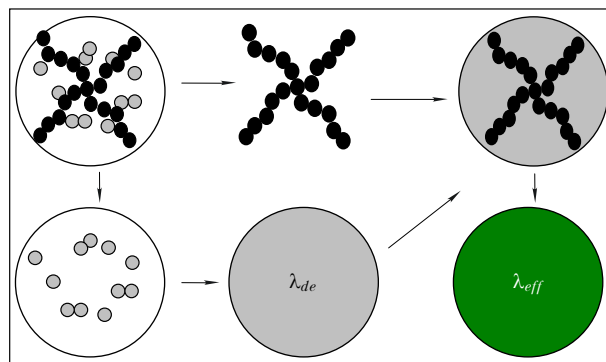


Рис. 2. «Термическая» модель для оценки эффективной теплопроводности фракталоподобных агрегатов [12]

Модель [12] первоначально была предназначена для оценки характеристик системы «частица–жидкость», поэтому для проверки ее работоспособности для аэрозолей были проведены тестовые расчеты чувствительности модели к варьированию ряда определяющих параметров (в первую очередь, межфазного термического сопротивления), которые показали ее полную пригодность и для этой ситуации.

На рис. 3 представлена эффективная теплопроводность сажевых агрегатов, рассчитанная для условий, соответствующих эксперименту [4]. Характерным размером агрегата в модели [12] является радиус гирации  $R_g$ ; он связан с радиусом подвижности как  $R_m = \beta R_g$ , где  $\beta = 0,75$  для DLCA-сценария образования агрегата с  $D_f = 1,80$  [9]. Коэффициент теплопроводности первичных частиц (фактически это микрокристаллиты графита) изменяется в диапазоне (50 ÷ 100) Вт/мК [14]. Из рис. 3 видно, что при фиксированном радиусе первичных частиц  $R_a$  эффективная теплопроводность агрегата  $\Lambda$  не является постоянной: она монотонно уменьшается с возрастанием радиуса гирации  $R_g$  (при фиксированной величине  $D_f$  у агрегата уменьшается эффективная плотность), а при фиксированном радиусе гирации  $R_g$  она

возрастает с увеличением радиуса первичных частиц  $R_a$  (эффективная плотность агрегата увеличивается). Очевидно, что модель [12] дает разумные значения эффективной теплопроводности для сажевых агрегатов  $\Lambda$ , пригодные для описания экспериментальных данных [4] и согласующиеся с известными литературными данными [15].

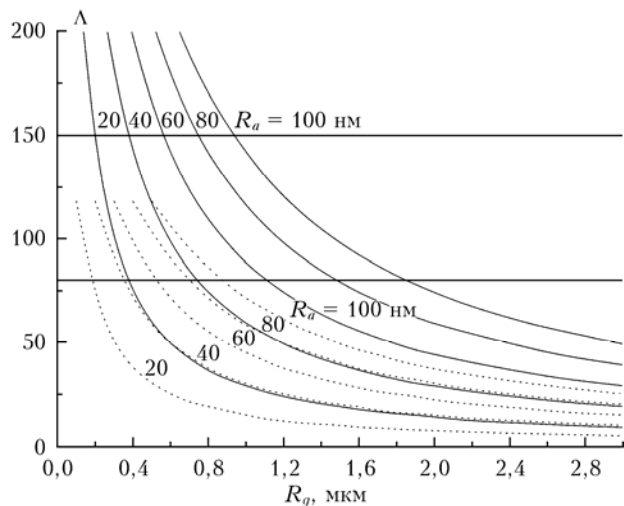


Рис. 3. Относительная эффективная теплопроводность  $\Lambda$  агрегатов сажи в азоте как функция радиуса гирации  $R_g$  для различных радиусов  $R_a$  и коэффициентов теплопроводности первичных частиц (микрористаллический графит)  $\lambda_a = 50$  (пунктир) и  $100$  Вт/мК (сплошные линии). Горизонтальные линии ограничивают общепринятый в литературе диапазон  $\Lambda$

Таким образом, мы приходим к выводу о переменности (уменьшении) эффективной теплопроводности агрегата с увеличением его размера при фиксированных параметрах фрактальной структуры. Данная теоретическая методика может оказаться единственно приемлемой для корректной оценки эффективной (виртуальной) теплопроводности реальных фракталоподобных агрегатов, образовавшихся по тому или иному сценарию укрупнения первичных частиц. Дело в том, что коэффициенты эффективной теплопроводности агрегатов частиц в порошкообразных материалах, определенные по стандартным измерительным методикам и представленные в справочниках, в общем случае могут сильно отличаться от подобных характеристик для аэрозольных агрегатов. Детали расчетов и анализа величины эффективной теплопроводности агрегатов приведены в [15, 16].

Вернемся к сопоставлению теоретических результатов с экспериментом [4] (см. рис. 1, б). В предположении постоянства  $D_f = 1,80$ , монодисперсности первичных частиц в агрегате ( $R_a = 15 \div 40$  нм) и обоснованном расчетами значении  $\lambda_a = 80$  Вт/мК [14] такое сопоставление дает вполне удовлетворительное согласие с экспериментом [4], что означает работоспособность и пригодность развиваемой «фотофоретической» модели, основанной на характеристиках фракталоподобных агрегатов сажи, для дальнейших

оценок возможных атмосферных проявлений этого явления.

## Возможные атмосферные проявления

Подтверждение работоспособности новой микрофизической модели позволяет проанализировать проявления фотофореза для хорошо поглощающих излучение аэрозолей сажи в поле атмосферной радиации (см., например, [5, 6]). Расчеты по новой модели вновь показывают возможность конкуренции фотофоретических сил в поле коротковолнового солнечного излучения и силы тяжести для агрегатов сажи: в определенном диапазоне размеров частиц отношение сил может значительно превышать единицу. Отношение сил  $F_{ph}/F_{mg}$  очень сильно зависит от характеристик первичных частиц: увеличение значений  $R_a$ ,  $\rho_a$  и  $\lambda_a$  уменьшает транспортные возможности фотофореза, так как при этом агрегат становится более теплопроводящим, плотным и массивным, а значит уменьшается и фотофоретический (радиометрический) эффект.

На рис. 4 представлены результаты расчетов так называемых «высот левитации» — высот в условиях стационарной атмосферы, где силы «солнечного» фотофореза уравновешиваются силами тяжести; на таких высотах возможно ожидать локализацию частиц сажи с определенными оптическими и теплофизическими свойствами. Для сопоставления приведены данные для модели однородных сферических частиц [5]. Основной результат очевиден: новая модель допускает левитацию частиц определенных размеров и свойств на высотах верхней тропосферы — нижней стратосферы. Эти результаты получены для агрегатов сажи  $R_a$  до 40 нм и  $\lambda_a$  до 100 Вт/мК,

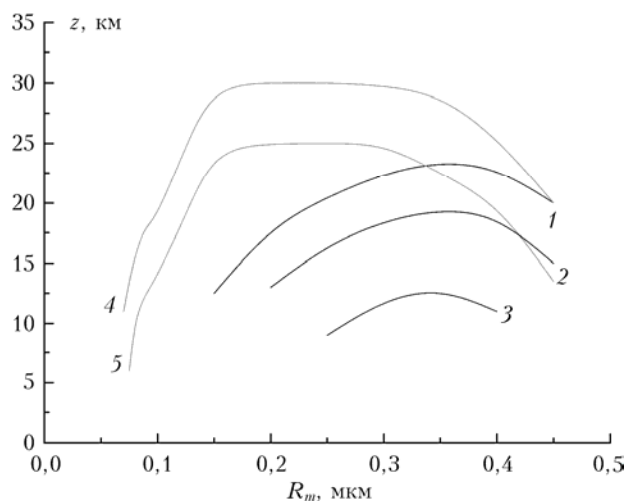


Рис. 4. Высоты возможной локализации частиц сажи для стационарной экваториальной атмосферы под действием «солнечного» фотофореза: 1 — модель фракталоподобных частиц при  $D_f = 1,80$ ;  $\rho_a = 2$  г/см<sup>3</sup>;  $R_a = 20$  нм;  $\lambda_a = 50$  Вт/мК; 2 — то же, но при  $\lambda_a = 100$  Вт/мК; 3 —  $R_a = 40$  нм;  $\lambda_a = 50$  Вт/мК; 4 — модель однородных сферических частиц [5] при  $\Lambda = 5$ ,  $\rho_p = 0,165$  г/см<sup>3</sup>; 5 — то же, но при плотности частицы  $\rho_p = 0,350$  г/см<sup>3</sup>

как в эксперименте [4]. Однако комбинация  $R_a = 40$  нм,  $\lambda_a = 100$  Вт/мК и  $\rho_a = 2$  г/см<sup>3</sup> уже не дает этого результата — радиометрический эффект становится слишком мал из-за большой теплопроводности и массы агрегатов. При этом, по сравнению с моделью однородных сфер, заметны и важные количественные изменения: левитация становится возможной только для более крупных частиц (мелкие агрегаты слишком теплопроводны), а высоты левитации существенно уменьшаются за счет повышения эффективной теплопроводности частиц по сравнению с принятыми в расчетах [5].

Рис. 5 иллюстрирует схожую ситуацию для проявлений «теплового» фотофореза [6]. Расчеты вновь подтверждают возможность конкуренции фотофоретических сил в поле длинноволнового теплового излучения и силы тяжести для агрегатов сажи — в определенном диапазоне размеров частиц отношение сил может превышать единицу, но этот диапазон размеров уже иной, чем при «солнечном» фотофорезе. При «теплом» фотофорезе нет ограничений на достаточно большие размеры частиц [2, 16], причем расчеты показывают, что отношение  $F_{ph}/F_{mg}$  может превышать единицу для агрегатов размерами вплоть до 5 мкм на высотах средней и верхней атмосферы [16]. Этот вывод может быть следствием определенных ограничений теории: в расчетах полагалось  $D_f = 1,80 = \text{const}$ ; агрегаты сажи с такой фрактальной размерностью могут легко компактизоваться под действием различных факторов, а их фрактальная размерность существенно увеличиваться. В результате эффективная плотность и теплопроводность реальных сажевых агрегатов могут быть значительно большими, а фотофоретическая сила — существенно меньшей. Тем не менее предсказываемые высокие транспортные возможности «теплового» фотофореза фракталоподобных агрегатов сажи яв-

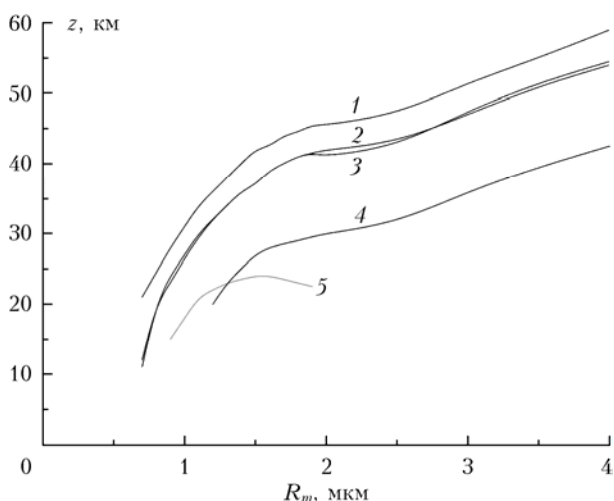


Рис. 5. Высоты возможной локализации частиц сажи для стационарной экваториальной атмосферы под действием «теплового» фотофореза: 1 — модель фракталоподобных частиц при  $D_f = 1,80$ ;  $\rho_a = 2$  г/см<sup>3</sup>,  $R_a = 20$  нм,  $\lambda_a = 50$  Вт/мК; 2 — то же, но при  $\lambda_a = 100$  Вт/мК; 3 —  $R_a = 40$  нм,  $\lambda_a = 50$  Вт/мК; 4 —  $R_a = 40$  нм,  $\lambda_a = 100$  Вт/мК; 5 — модель однородных сферических частиц [6] при  $\Lambda = 5$ ,  $\rho_p = 0,165$  г/см<sup>3</sup>

ляются достаточно неожиданными и требуют дальнейшего анализа.

## Заключение

В [5] констатировалось, что на сегодняшний день не существует последовательной теории фотофореза фракталоподобных частиц, учитывающей их структурные параметры. Выше представлена попытка разработки такой теории, которая качественно и количественно согласуется с экспериментом [4], на основе которого и создавалась теория. С другой стороны, в [4] исследовался определенный класс сажевых агрегатов (DLCA-сценарий образования агрегатов с фрактальной размерностью  $D_f = 1,80$ ). Поэтом весьма актуальным является продолжение подобных экспериментов с детальной аттестацией исследуемых частиц и расширением диапазона определяющих параметров. Анализ возможных атмосферных проявлений динамики агрегатов сажи в поле атмосферной радиации предсказывает необычно высокие транспортные возможности «теплового» фотофореза: его силы могут конкурировать с силой тяжести для частиц микронных размеров на высотах средней и верхней стратосферы.

Работа выполнена в рамках проекта № 3.6064.2017/БЧ базовой части государственного задания высшим учебным заведениям, подведомственным Минобрнауки РФ, при финансовой поддержке в рамках постановления № 211 Правительства РФ, контракта № 02.А03.21.0006 и гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых № МК-9289.2016.5.

1. 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.
2. Береснев С.А., Кочнева Л.Б. Фактор асимметрии поглощения излучения и фотофорез аэрозолей // Оптика атмосфер и океана. 2003. Т. 16, № 2. С. 134–141.
3. Ковалев Ф.Д. Экспериментальное исследование фотофореза в газах: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Екатеринбург: Уральский гос. ун-т, 2003. 24 с.
4. 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.
5. Береснев С.А., Кочнева Л.Б., Журавлева Т.Б., Фирсов К.М. Фотофоретическое движение сажевых аэрозолей в поле коротковолнового солнечного излучения // Оптика атмосфер и океана. 2012. Т. 25, № 2. С. 175–180; Beresnev S.A., Kochneva L.B., Zhuravleva T.B., Firsov K.M. Photophoretic motion of soot aerosol in field of shortwave solar radiation // Appl. Ocean. Opt. 2012. V. 25, N 4. P. 286–291.
6. 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.
7. Nyeki S., Colbeck I. Fractal dimension analysis of single, in-situ, restructured carbonaceous aggregates // Aerosol Sci. Technol. 1995. V. 23, N 2. P. 109–120.
8. Beresnev S.A., Vasiljeva M.S., Gryazin V.I., Kochneva L.B. Photophoretic motion of fractal-like soot aggregates: Experiment and theory comparison // Proc. SPIE. 2014. V. 9292. Paper No. 92920Z.

9. *Sorensen C.M.* The mobility of fractal aggregates: A review // *Aerosol Sci. Technol.* 2011. V. 45. P. 765–779.
10. *Chang H., Charalampopoulos T.T.* Determination of the wavelength dependence of refractive indices of flame soot // *Proc. Roy. Soc. Lond. A.* 1990. V. 430. P. 577–591.
11. *Chylek P., Srivastava V., Pinnick R.G., Wang R.T.* Scattering of electromagnetic waves by composite spherical particles: Experiment and effective medium approximations // *Appl. Opt.* 1988. V. 27, N 12. P. 2396–2404.
12. *Evans W., Prasher R., Fish J., Meakin P., Phelan P., Keblinski P.* Effect of aggregation and interfacial thermal resistance on thermal conductivity of nanocomposites and colloidal nanofluids // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2008. V. 51. P. 1431–1438.
13. *Nan C.-W., Birringer R., Clarke D.R., Gleiter H.* Effective thermal conductivity of particulate composites with interfacial thermal resistance // *J. Appl. Phys.* 1997. V. 81, N 10. P. 6692–6699.
14. *Теплопроводность твердых тел: Справочник* / Под ред. А.С. Охотина. М.: Энергоатомиздат, 1984. 320 с.
15. *Beresnev S.A., Vasiljeva M.S., Gryazin V.I., Kochneva L.B.* Modeling of microphysical characteristics for fractal-like soot aggregates: The effective heat conductivity // *Proc. SPIE.* 2015. V. 9680. DOI: 10.117/12.2205019.
16. *Beresnev S.A., Vasiljeva M.S., Gryazin V.I., Kochneva L.B.* Photophoresis of fractal-like soot aggregates: Possible atmospheric applications // *Proc. SPIE.* 2016. V. 10035. Paper No. 10035-62.

*S.A. Beresnev, M.S. Vasiljeva, V.I. Gryazin, L.B. Kochneva.* **Photophoresis of fractal-like soot aggregates: microphysical model, comparison with experiment and possible atmospheric applications.**

A microphysical model of photophoretic motion of soot aggregates is presented, which takes into account their fractal structure. Comparison with known experimental data is executed, and good qualitative and quantitative agreements are shown. Characteristics of photophoretic motion of fractal-like soot aggregates in the field of atmospheric radiation are calculated. For the model of fractal-like particles, the photophoretic effects with soot aerosol in the stationary atmosphere are the most pronounced in the upper troposphere – middle stratosphere.