

Р.Ф. Рахимов

НЕАДДИТИВНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА ЧАСТИЦАМИ АТМОСФЕРНОЙ ДЫМКИ В СОСТАВЕ ЖИДКОКАПЕЛЬНЫХ ОБЛАКОВ

На основе модели многослойной концентрически неоднородной водной капли изучены различные варианты участия частиц атмосферной дымки в поглощении света жидкокапельными облаками. Присутствие в структуре водной капли тонкого умеренно поглощающего слоя с объемом 0,1 % почти на порядок усиливает эффективность поглощения жидкокапельными облаками. При этом наибольший эффект – от инородных включений, при их концентрации в центре капли. По мере перемещения слоя от центра к поверхности капли его роль в поглощении света заметно ослабевает. Для капель с умеренно поглощающим поверхностным слоем характерна сильно осциллирующая зависимость $K_a(\rho)$, которая для некоторых ρ может превосходить поглощение от аналогичных, с инородными включениями, сосредоточенными в центре. Оценки для полидисперсного ансамбля выявили эффект неаддитивности поглощения света частицами атмосферной дымки при различных вариантах их присутствия в составе облаков. Частицы атмосферной дымки, как инородные включения, сконцентрированные в центре капель, поглощают видимое излучение в 1,5–3 раза эффективнее, чем при тех же геометрических размерах, диэлектрических свойствах и количестве, самостоятельно находясь в межкапельном пространстве.

1. Введение

Тонкодисперсная компонента атмосферы, обладающая высокоразвитой поверхностью и подвижностью благодаря глобальному распространению, оказывает влияние на тепловой баланс, не только непосредственно поглощая и рассеивая солнечное излучение, но и косвенно являясь активным участником фазовых превращений влаги в атмосфере, и в первую очередь – процесса облакообразования [1]. Существенно видоизменяя микроструктуру водных облаков и туманов [2], частицы атмосферной дымки в конечном счете определяют и такие важные, с точки зрения климатологии, свойства атмосферы, как альbedo облачных полей [3–5].

Несмотря на свою длительную предысторию решения, а также рождение множества гипотез [5], от недоучета вклада в поглощение крупных капель [6] до эффекта горизонтального переноса рассеянной радиации в облачных слоях вследствие их оптической неоднородности [7, 8], проблема аномального поглощения в облаках [5] по-прежнему сохраняет свою остродискуссионность. По-видимому, для удовлетворительного количественного объяснения так называемого избыточного поглощения коротковолновой радиации в кучевых облаках и относительно низких значений альbedo порядка (78–83 %) необходимо привлечение не одной, а одновременно нескольких гипотез.

В задачах по оценке радиационного режима тропосферного слоя [7–10] возможный эффект облаков и облачных полей прогнозируется, в основном, в рамках так называемых «чистых» (т.е. исключительно водных) оптических моделей Дейрменджана [11] или родственных им. Немногие теоретические оценки поглощающего эффекта частиц атмосферной дымки в составе облаков, как правило, опираются на

гипотезу аддитивной добавки. Эти оценки показывают, что даже при самом оптимистичном прогнозе вклад обсуждаемых частиц в удельное поглощение видимого излучения облаком в несколько раз ниже эмпирических оценок [12].

В самом деле, даже если принять за среднее значение альbedo однократного рассеяния атмосферной дымки $\Lambda_\sigma = 0,9–0,95$ [13] при средней замутненности приземного слоя атмосферы $\beta_e \sim 0,15–0,2 \text{ км}^{-1}$, частицы дымки, вовлекаемые в процесс облакообразования на высоте уровня конденсации, как аддитивная добавка дисперсной смеси, способствуют увеличению поглощательной способности облаков на величину $\beta_\alpha \sim 0,012–0,019 \text{ км}^{-1}$, что явно недостаточно для объяснения эффекта аномального поглощения даже для облаков с малой оптической плотностью.

Процесс образования жидкокапельной фазы при интенсивных конвективных выносах теплых увлажненных воздушных масс из пограничного слоя в свободную атмосферу протекает в газодисперсной смеси с большим содержанием частиц атмосферной дымки [2]. Условие медленного понижения температуры при восходящих движениях атмосферной влаги накладывает запрет на спонтанную конденсацию [2, 15], ограничивает участие частиц атмосферной дымки в формировании жидкокапельной фазы, позволяя проявляться в роли центров конденсации лишь части, наиболее гигроскопичных из них. Таким образом, частицы атмосферной дымки в облаках присутствуют одновременно и как самостоятельная фракция малоактивных конденсирующих центров в межкапельном пространстве, и как нерастворимые остатки от активных ядер в структуре капель.

Взаимодействие глобальной аэрозольной компоненты атмосферы с облачными полями не завершается только стадией конденсационного формирования жидкокапельной фазы. Комплекс процессов

подоблачного и внутриоблачного вымывания частиц атмосферной дымки способствует активному вовлечению тонкодисперсной компоненты в структуру облачных капель и на последующих этапах развития облаков. Значительные градиенты температуры внутри облаков вертикального развития в сочетании с интенсивными встречными потоками способствуют захвату каплями (в процессе движения) нерастворимых существенно поглощающих материалов, не исключая возможности формирования на поверхности капель так называемой покровной фазы [14], с отличными от воды диэлектрическими свойствами. Многослойная морфологическая структура капель способна активизировать взаимодействие излучения с каплей и породить эффекты резонансного поглощения, поэтому в настоящей статье вопрос о теоретически ожидаемом эффекте присутствия частиц атмосферной дымки в составе жидкокапельных облаков был подвергнут более глубокому анализу на основе модели, предполагающей в составе облаков наличие капель с многослойной концентрически неоднородной диэлектрической структурой. Особое внимание уделено сопоставлению теоретических оценок с различными вариантами участия частиц атмосферной дымки в поглощении облаками радиации.

2. Фактор эффективности поглощения многослойных капель

Несмотря на то, что число работ по исследованию зависимости факторов эффективности ослабления, рассеяния и поглощения давно перевалило за несколько сотен, тем не менее с выводами относительно таких характеристик полидисперсной системы, как альбеда однократного рассеяния, коэффициент поглощения связано немало ошибочных заключений, которые возникают при поверхностном анализе указанных вопросов.

На серии рис. 1 представлены расчетные данные для фактора эффективности поглощения однородных водных капель (кривая 1), а также имеющих инородные поглощающие включения в центре (2), на периферии (4) (рис. 1, д) сферической капли, а также с промежуточным слоем (3) (рис. 3) на различных диапазонах изменения параметра дифракции. Здесь r_1 – внутренний радиус промежуточного слоя; r_2 – внешний радиус промежуточного слоя; r_s – радиус капли. Причем толщина слоев оценивалась исходя из процентного содержания поглощающей фракции в составе капли. В частности, если через η обозначить отношение суммарного объема частиц дымки или сажи V_h [мкм³ · см⁻³] к суммарному объему водной компоненты в составе капель облаков V_c [мкм³ · см⁻³], то, например, для структуры капли, представленной на рис. 1, д, радиус ядра r_1 оценивался исходя из соотношения $r_1 = r_s \exp(\ln(0,5\eta)/3)$, в то время как $r_2 = r_s \exp(\ln(1 - 0,5\eta)/3)$. В случае, когда поглощающие инородные включения образуют промежу-

точный слой, его геометрические параметры оценивались как $r_1 = \varepsilon_1 r_s$ и $r_2 = \varepsilon_1 r_s \exp(\ln(1 + \eta)/3) = \varepsilon_2 r_s$.

Оптические постоянные (ОП) сажевого, водного слоев капли, а также частиц атмосферной дымки моделировались в соответствии с данными [16, 17] и, в частности, для длины волны рубинового лидара с $\lambda = 0,6943$ мкм задавались соответственно $m_s = 1,84 - i 0,79$; $m_w = 1,33 - i 33 \cdot 10^{-9}$; $m_a = 1,541 - i 6,94 \cdot 10^{-3}$.

Как видно из содержания представленных оценок, фактор эффективности поглощения K_a существенно зависит от морфологии частиц, причем не только от количества поглощающих инородных включений, но и расположения слоя. Оценки, приведенные для случая 2, практически мало отличаются от случая для двухслойной водной капли с поглощающим ядром, как, впрочем, и от промежуточного варианта 3. А вот частицы с весьма тонким покровным слоем (первый и второй слои предполагались чисто водными) при том же суммарном объеме поглощающего слоя, что и в случаях 2, 3, поглощают существенно меньше. Все зависимости рассчитаны с шагом по $\rho \sim 0,01$. На рис. 1, б–г отдельные интервалы изменения данных рис. 1, а представлены в более крупном масштабе. Хорошо выраженная резонансная структура данных 1 и 4 прописывается детально на основе 4–7 точек по контуру пика (см. рис. 1, б, кривая 3).

Прежде всего бросается в глаза тот факт, что присутствие в составе капли инородных включений, даже из умеренно поглощающих материалов, резко (почти на порядок) изменяет поглощающие свойства практически во всем рассмотренном интервале изменения параметра дифракции $\rho = 2\pi r/\lambda$, хотя по объему они составляют лишь 0,1 % от капли в целом. Во-вторых, для полидисперсных систем наиболее ощутим вклад поглощающих добавок, когда они сконцентрированы в центре капель и их роль постепенно убывает по мере перемещения поглощающего слоя трехслойных капель от центра к поверхности капли. В то же время следует обратить внимание на тот факт, что при увеличении параметра дифракции до значений $\rho \sim 20$ и более для капель с поверхностным поглощающим слоем характерна сильно осциллирующая зависимость, значения которой могут при определенных значениях ρ превосходить поглощение от капель с инородными включениями, сосредоточенными в центре капли. Однако в случае усреднения по полидисперсному ансамблю частиц эти высокочастотные осцилляции все же не играют главенствующей роли, поскольку большая часть точек кривых $K_a(\rho)$ соответствуют основному выводу о поглощающей значимости расположения слоев в трехслойной капле. В то же время если провести аналогичные расчеты для однородных сфер с показателем преломления, вычисленным исходя из объемного содержания водной и поглощающей компонент капли, то для умеренно поглощающих материалов,

под которыми в данном случае подразумеваются частицы атмосферной дымки континентального происхождения [13], эффективность поглощения таких частиц все же уступает поглощению от ка-

пель с трехслойной структурой, т.е. в которых частицы дымки концентрируются вблизи центра капли или образуют локализованный промежуточный слой.

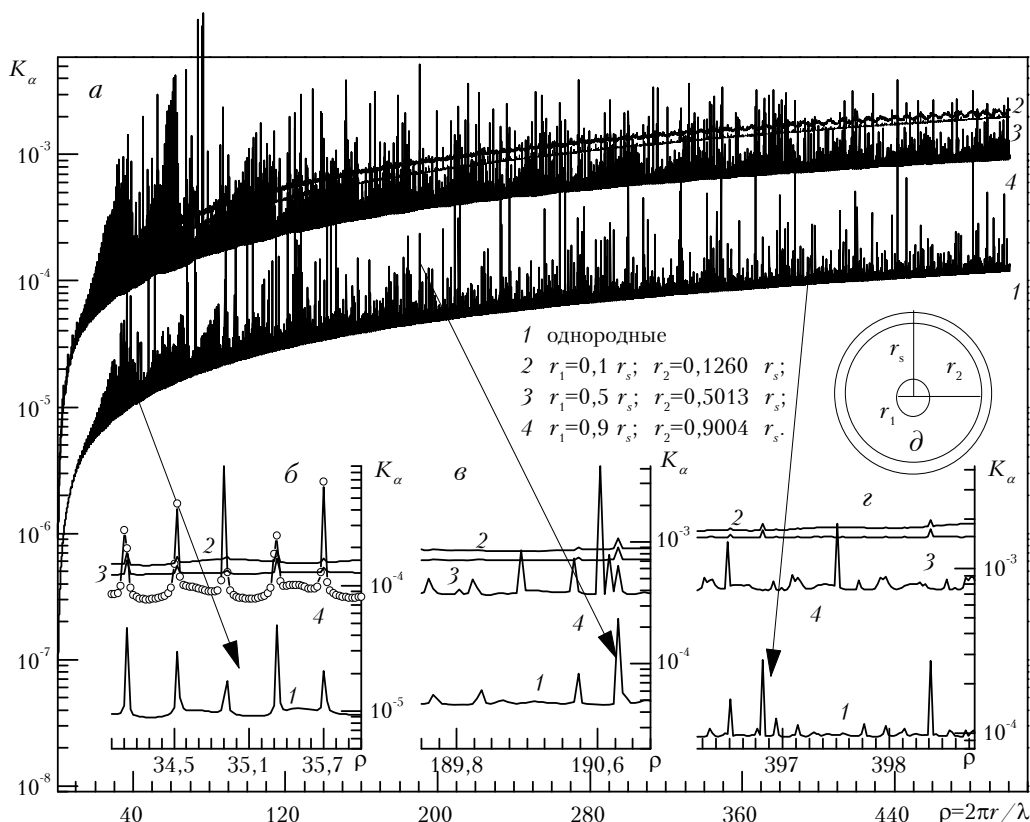


Рис. 1. Зависимость фактора эффективности поглощения $K_\alpha(\rho)$: 1 – для однородных капель; 2–4 – для различных вариантов расположения поглощающего слоя внутри капли; а – на интервале изменения ρ от 0,5 до 500; б – з – на отдельных участках

Следует также отметить, что при перемещении поглощающего слоя от центра к поверхности капли усиливается резонансная структура зависимости $K_\alpha(\rho)$, поэтому при усреднении поглощения такими каплями по полидисперсному ансамблю необходимо брать достаточно подробный шаг по $\rho \sim 0,03-0,01$. Поэтому оцениваемые параметры поглощения для полидисперсных аналогов зависят от конкретных особенностей спектра размеров: диапазона и преобладающего размера частиц, а также от отношения числа мелких частиц к крупным. Рассмотрим далее, каким образом отмеченные особенности поглощения для отдельных капель могут отразиться на свойствах облаков как полидисперсной смеси.

3. Вклад частиц дымки в поглощение полидисперсной системой облачных капель

Формирование и развитие облачных структур – результат сложного взаимодействия крупномасштабных циркуляционных процессов с конкретными мезомасштабными турбулентными потоками между приземным слоем и свободной атмосферой и, кроме того, зависит от наличия и состава ядер конденсации.

Поэтому спектры распределения капель по размерам в облаках достаточно разнообразны. Подавляющая статистика экспериментальных данных свидетельствует о приемлемости аппроксимации измеренных спектров модифицированным гамма-распределением [18]:

$$f(r) = dN/dr = Ar^{-\alpha} \exp \{-br^\gamma\}. \quad (1)$$

Причем реальные измерения спектра размеров облачных капель показывают [18], что интервал размеров капель в плотных кучевых и слоистообразных облаках достаточно протяжен в область крупных размеров и заметно шире, чем это предполагается в известных моделях Дейрменджана (рис. 2).

Значения параметров распределения (1), используемых для расчетов в настоящей работе, представлены в таблице.

Теоретические оценки параметров аэрозольного светорассеяния для полидисперсных систем, состоящих из концентрически неоднородных сфер, многочисленны вследствие трудоемкости и компьютерной неустойчивости расчетных алгоритмов, весьма чувствительно зависящих от исходных параметров частиц. В ходе компьютерных вычислений, вследст-

вие сложности алгоритмизируемых математических выражений для коэффициентов a_n, b_n , определяющих ядро решения задачи рассеяния света на многослойных сферических структурах, существенно возрастает частота возникновения ситуаций сингулярности (вследствие конечности разрядной сетки представления чисел в компьютерном виде) на промежуточных этапах вычислений, хорошо известных в теории Ми, амплитудных коэффициентов a_n и b_n [16].

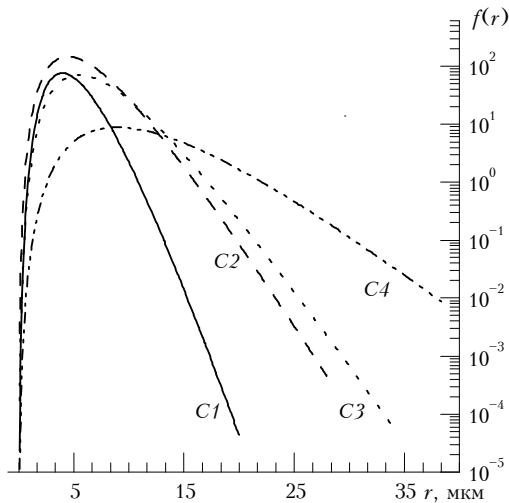


Рис. 2. Функция распределения облачных капель по размерам различных типов облаков (обозначения кривых соответствуют обозначениям, используемым в таблице, где указаны параметры распределений)

Конкретные особенности алгоритма, применяемого в настоящей работе для расчета оптических характеристик водных облаков в предположении концентрической неоднородности капель, подробно изложены в [13]. В частности, объемные коэффициенты оптического взаимодействия вычислялись усреднением по полидисперсному ансамблю по достаточно традиционной схеме

$$\beta_{\varepsilon, \sigma, \pi, \alpha}(m, \lambda) = \int_{r_1}^{r_2} K_{\varepsilon, \sigma, \pi, \alpha}(r, m) \pi r^2 f(r) dr, \quad (2)$$

где индексы $\varepsilon, \sigma, \pi, \alpha$ соответственно обозначают типы оптического взаимодействия: ослабления, полного, обратного рассеяния и поглощения; $K_{\varepsilon, \sigma, \pi, \alpha}$ — соответствующие факторы эффективности ранее указанных типов оптического взаимодействия.

Элементы нормированной матрицы рассеяния полидисперсного ансамбля вычислялись на основе аналогичного усреднения

$$P_j(m, \lambda, f(r), \theta) = \frac{4\pi}{\beta_s} \int_{r_1}^{r_2} \sigma_j(r, m, \theta) f(r) dr, \quad (3)$$

из которых затем вычислялись значения индикатрисы рассеяния

$$g(\theta) = (P_1(\theta) + P_2(\theta))/8\pi \quad (4)$$

и степени поляризации рассеянного излучения:

$$p(\theta) = (P_1(\theta) - P_2(\theta))/(P_1(\theta) + P_2(\theta)). \quad (5)$$

Для анализа эффективности поглощения, рассеяния и отражения радиации облаками обычно используется величина вероятности выживания кванта или альbedo однократного рассеяния:

$$\Lambda_\sigma = \beta_\sigma/\beta_\varepsilon, \quad (6)$$

а также значение индикатрисы рассеяния назад

$$g_\pi = \beta_\pi/(4\pi \beta_\sigma) = P_1(\theta = \pi)/4\pi = P_2(\theta = 180^\circ)/4\pi. \quad (7)$$

Для сопоставления различных версий внедрения частиц атмосферной дымки в работе использован параметр, показывающий величину отличия отношения поглощения частиц дымки в составе капель и в межкапельном пространстве от единицы:

$$\xi_{r\alpha} = \beta_{\alpha c}/\beta_{\alpha h} - 1. \quad (8)$$

Расчеты полидисперсных оптических характеристик облаков выполнены с усреднением по ансамблю на интервале размеров 0,1–80 мкм, с подробным шагом $\Delta r = 0,1-0,025$, в интервале углов 0–180°, с шагом $\Delta\theta = 1-3^\circ$.

4. Результаты расчетов

Как нетрудно видеть из рис. 1, расширение интервала усреднения полидисперсных характеристик для чисто водных капель (без инородных включений) до 50 мкм и более заметно уступает по своей значимости даже относительно небольшому вовлечению частиц дымки в состав облачных капель и может обеспечить увеличение поглощающих свойств полидисперсной смеси лишь на 2–3 %, что явно недостаточно для объяснения эффекта даже с учетом многих кратностей актов рассеяния излучения в оптически плотных облаках.

Модельные оценки показывают, что от внедрения частиц атмосферной дымки в микроструктуру капель наибольший эффект обнаруживается вне полос поглощения воды, в частности в видимом диапазоне длин волн.

В расчетах было рассмотрено четыре варианта присутствия частиц атмосферной дымки в микроструктуре жидкокапельных облаков:

- а) нерастворимые инородные включения сконцентрированы в центре капли и образуют ядро;
- б) частицы атмосферной дымки покрывают тонким слоем поверхность капель;
- в) в виде промежуточного слоя имитируют взвешенное внутри капли распределение тонкодисперсных инородных включений;
- г) как самостоятельная подфракция облаков в межкапельном пространстве, т.е. как поглощающая аддитивная добавка.

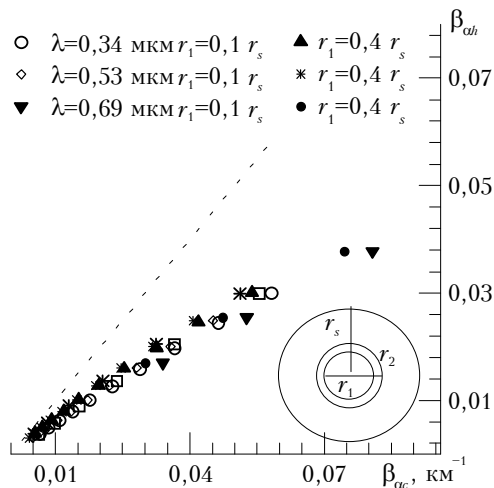


Рис. 3. Диаграмма сопоставления расчетных оценок коэффициента поглощения частиц дымки β_{ac} в составе облачных капель (ось X) и межкапельном пространстве β_{ah} (ось Y) для различных длин волн видимого диапазона и расположения поглощающего слоя внутри капли

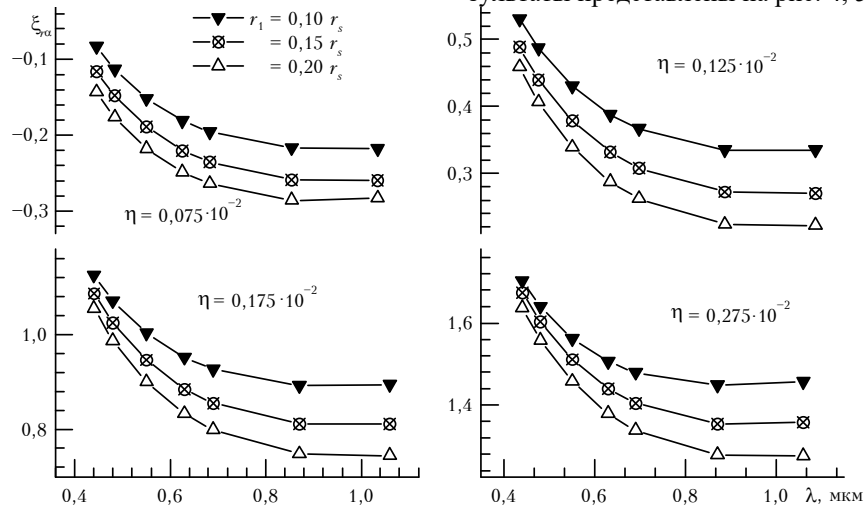


Рис. 4. Спектральная изменчивость коэффициента эффективности поглощения частиц дымки $\xi_{r,\alpha}$ как инородных включений при различном процентном их содержании η и концентрации поглощающих включений вблизи центра капель

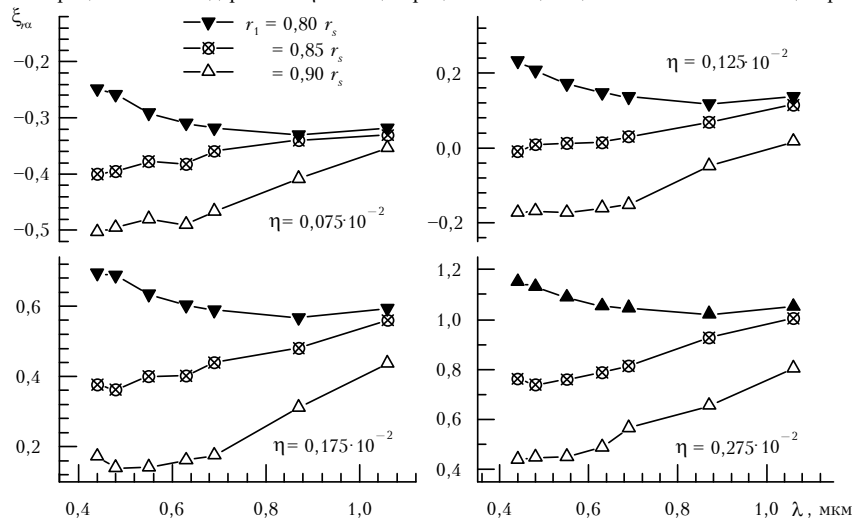


Рис. 5. Спектральная изменчивость коэффициента эффективности поглощения частиц дымки $\xi_{r,\alpha}$ как инородных включений при различном процентном их содержании η и концентрации поглощающих включений у поверхности капель

Сопоставление различных гипотез внедрения поглощающих частиц в состав облаков показывает, что в видимом диапазоне длин волн (см. рис. 3) для инородных включений капля характерна неаддитивность вклада частиц атмосферной дымки в общее поглощение облачной смеси. Частицы атмосферной дымки, вовлекаемые в процессе облакообразования в структуру капель как инородные включения, поглощают видимое излучение в 1,5–3 раза эффективнее, чем при тех же геометрических размерах, диэлектрических свойствах и количестве, самостоятельно находясь в межкапельном пространстве. На рис. 3 для сравнения пунктирной линией указано геометрическое место точек, которое могли бы занять расчетные данные при отсутствии эффекта неаддитивности.

В расчетах было рассмотрено несколько гипотез относительных толщины и положения поглощающего слоя $r_1/r_s \sim 0,01$ до $0,9$, при этом в ряде вариантов допускалось увеличение объемной доли поглощающей компоненты до $0,3\%$. Более подробно эти результаты представлены на рис. 4, 5.

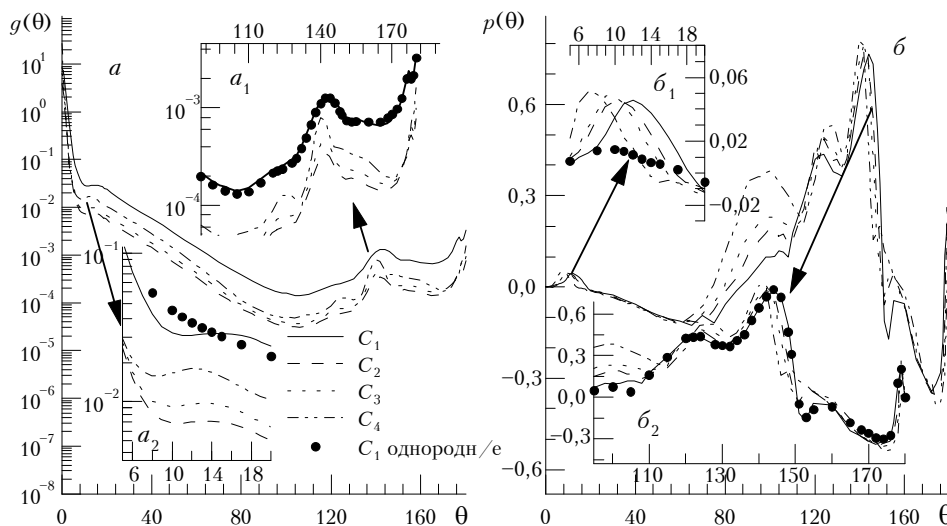


Рис. 6. Влияние ядра конденсации на угловые функции облачного светорассеяния для различных типов облаков: $g(\theta)$ – нормированной индикатрисы рассеяния; $p(\theta)$ – степени поляризации; кружками показан вариант расчета для однородных водных капель и спектра размеров облака $C1$

На рис. 4 представлены результаты оценок спектральной изменчивости коэффициента эффективности поглощения частиц дымки $\xi_{r\alpha}$ как инородных включений при их концентрации вблизи центра капли. Расчеты выполнены для видимой и ближней ИК-области спектра оптического излучения. Как видно из представленных на рис. 4 данных, при превышении 0,1 % относительной доли поглощающих веществ в капле поглощающий эффект частиц дымки устойчиво возрастает, водная оболочка капли способствует повышению эффективности поглощения инородных включений по сравнению с их ролью в межкапельном пространстве.

В случае когда инородные включения капель находятся вблизи поверхности капель (см. рис. 5), эффект усиления поглощающей роли частиц дымки заметно слабее, чем в первом случае, и при небольших концентрациях даже может иметь место обратный эффект – вклад в общее поглощение частиц дымки в составе капель может быть даже меньше, чем в межкапельном пространстве.

Предположение о возможном наличии в структуре капель нерастворимых инородных включений приводит к заметным изменениям в форме индикатрисы рассеяния и угловой зависимости степени поляризации (рис. 6) в интервале углов рассеяния $\theta \sim 5-20^\circ$, которые качественно согласуются с основными различиями двух групп экспериментальных данных [13]. На рисунках специально выделен этот подынтервал в виде отдельных подрисунков как для индикатрисы рис. 6, a_1 , так и для степени поляризации рис. 6, b_1 . Что касается других углов рассеяния (рис. 6, a_2 и b_2), различия между однородными и неоднородными каплями не столь существенны, чтобы говорить об устойчивой закономерности.

Таким образом, при моделировании переноса радиации в оптически плотных облаках, где эффект многократного рассеяния доминирует, влиянием неоднородных включений на индикатрисы рассеяния по сравнению с возможными вариациями спектра размеров можно пренебречь (рис. 6, a). Именно изменения спектра размеров обуславливают вариации значений степени поляризации в интервале углов $70-120^\circ$ рис. 6, b и b_2 .

Основные результаты модельных оценок представлены в таблице. Расчеты выполнены для длины волны $\lambda = 0,6943$ мкм. В 13–15-й колонках условно указаны ОП слоев капли: «а» – вариант, когда ОП слоя соответствуют комплексному показателю преломления (КПП) частиц атмосферной дымки $m_a = 1,54 - i0,007$; «в» – воды с $m_b = 1,331 - i0,6972 \cdot 10^{-7}$; «с» – сажи с $m_c = 1,84 - i0,79$. В 16–17-й колонках таблицы указаны значения внутреннего и внешнего радиусов промежуточного аэрозольного слоя. Толщина слоя оценивалась в каждом случае исходя из относительного объема поглощающих веществ в капле η , который указан в 18-й колонке таблицы.

Поскольку вопрос о сажевом компоненте атмосферы остается открытым (принимая во внимание увеличивающиеся масштабы антропогенного влияния на атмосферу), а имеющиеся сведения противоречивы, в модельном эксперименте были рассмотрены три варианта. Согласно двум первым гипотезам содержание сажи в составе атмосферной дымки составляет $\sim 0,1$ и $0,3$ %. Расчетные данные представлены в 13-й и 16-й строках таблицы. Кроме того, рассмотрена аномальная ситуация, когда содержание наиболее активно поглощающего компонента – сажи и частиц дымки составляет по $0,1$ % от объема облачных капель (16-я строка).

В таблице также представлены значения индикатрисы рассеяния для угла $g_\pi = g(\theta = \pi)$ и вероятности выживания кванта Λ_σ в актах однократного рассеяния в облаках, которые могут оказаться полезными для оценки отражательной способности облаков.

Оптические параметры различных типов облаков

Облако C1				Облако C2				Облако C3				Облако C4				Оптические постоянные слоев			Положение поглощающего слоя в капле и его объёмная доля		
$A = 2,373; \alpha = 6,0; \beta = 1,50; \gamma = 1,0$				$A = 0,07621; \alpha = 4,0; \beta = 0,684; \gamma = 0,9;$				$A = 1,157; \alpha = 5,0; \beta = 1,198; \gamma = 0,9$				$A = 7,919; \alpha = 4,5; \beta = 1,291; \gamma = 0,9$				m_1	m_2	m_3	r_1	r_2	η
β_{α_s} км ⁻¹	g_{π}	β_{α_s} км ⁻¹	Λ_{σ}	β_{α_s} км ⁻¹	g_{π}	β_{α_s} км ⁻¹	Λ_{σ}	β_{α_s} км ⁻¹	g_{π}	β_{α_s} км ⁻¹	Λ_{σ}	β_{α_s} км ⁻¹	g_{π}	β_{α_s} км ⁻¹	Λ_{σ}						
16,737	0,05070	0,00013	0,99999	34,195	0,05456	0,00061	0,99998	54,223	0,05340	0,00062	0,99999	69,187	0,05258	0,00068	0,99999	в	в	в	0,07937	0,99967	0,001
16,742	0,05155	0,00909	0,99946	34,204	0,05146	0,04063	0,99881	54,242	0,05229	0,04309	0,99921	69,212	0,05248	0,04892	0,99929	в	в	а	0,07937	0,99967	0,001
16,738	0,05094	0,01073	0,99936	34,194	0,05230	0,04436	0,99870	54,227	0,05192	0,04784	0,99912	69,191	0,05286	0,05553	0,99920	в	а	в	0,89979	0,90021	0,001
16,737	0,05250	0,01403	0,99916	34,195	0,05882	0,07500	0,99781	54,223	0,05661	0,07230	0,99867	69,187	0,05551	0,07842	0,99887	в	а	в	0,69966	0,70034	0,001
16,737	0,05114	0,01417	0,99915	34,195	0,06173	0,07656	0,99776	54,223	0,05541	0,07334	0,99865	69,187	0,05384	0,07942	0,99885	в	а	в	0,49933	0,50067	0,001
16,737	0,05158	0,01431	0,99914	34,195	0,06811	0,07800	0,99772	54,223	0,05716	0,07440	0,99863	69,187	0,05478	0,08046	0,99884	в	а	в	0,39896	0,40104	0,001
16,737	0,05130	0,01460	0,99913	34,195	0,06846	0,08003	0,99766	54,223	0,05875	0,07636	0,99859	69,187	0,05629	0,08243	0,99881	в	а	в	0,29814	0,30184	0,001
16,737	0,05220	0,01525	0,99909	34,195	0,05843	0,08149	0,99762	54,223	0,05476	0,07970	0,99853	69,187	0,05353	0,08613	0,99876	в	а	в	0,19574	0,20408	0,001
16,737	0,05362	0,01657	0,99901	34,195	0,05648	0,08346	0,99756	54,223	0,05549	0,08446	0,99844	69,187	0,05476	0,09214	0,99867	в	а	в	0,07937	0,11447	0,001
16,737	0,05147	0,01692	0,99899	34,195	0,05592	0,08195	0,99760	54,223	0,05394	0,08445	0,99844	69,187	0,05303	0,09274	0,99866	а	в	в	0,10000	0,99983	0,001
16,737	0,05347	0,03151	0,99812	34,195	0,05754	0,15746	0,99540	54,223	0,05423	0,16182	0,99702	69,187	0,05398	0,17619	0,99745	в	а	в	0,19129	0,20801	0,002
16,739	0,05131	0,02051	0,99877	34,195	0,05051	0,08566	0,99749	54,232	0,05129	0,09242	0,99830	69,191	0,05196	0,10507	0,99848	в	а	в	0,89959	0,90041	0,002
16,737	0,05082	0,16743	0,99000	34,195	0,05445	0,30303	0,99114	54,223	0,05347	0,51012	0,99059	69,187	0,05267	0,66589	0,99038	с	в	в	0,10000	0,99983	0,0010
16,737	0,05093	0,25421	0,98481	34,195	0,05460	0,46549	0,98639	54,223	0,05364	0,77809	0,98565	69,187	0,05275	1,01383	0,98535	с	в	в	0,12599	0,99967	0,0020
16,737	0,05092	0,32483	0,98059	34,195	0,05476	0,59948	0,98247	54,223	0,05378	0,99775	0,98160	69,187	0,05290	1,29828	0,98124	с	в	в	0,14422	0,99950	0,0030
16,740	0,05185	0,11508	0,99312	34,198	0,05271	0,21766	0,99364	54,230	0,05242	0,35754	0,99341	69,198	0,05255	0,46248	0,99332	с	в	а	0,07937	0,99983	0,0010

Полученные модельные оценки прежде всего показали, что частицы дымки в виде инородных включений при заданном относительном объеме их в облаках существенно (в среднем на два порядка) увеличивают удельное поглощение (сравните данные, приведенные в 3, 7, 11, 15-й колонках таблицы, особенно с 1-й по 13-ю строку). Наиболее эффективен вклад микродисперсных аэрозолей в поглощение, когда инородные включения концентрируются в центре капли. Поглощающее ядро и промежуточный слой способствуют увеличению индикатрисы рассеяния назад (см. 2, 6, 10, 14-ю колонки таблицы) на 2–4 %, в то время как поглощающая покровная фаза облачных капель уменьшает долю отраженной в обратном направлении радиации на 1–2 % (2-я и 16-я строки), что имеет значение при оценках восходящего и нисходящего потоков излучения в радиационных моделях.

Но особенно сильные изменения в поглощающих свойствах облаков происходят при вовлечении в структуру капель сажевой компоненты. Оценки показывают на увеличение удельного поглощения более чем на три порядка (см. 13-ю и 16-ю строки таблицы).

Резюмируя полученные результаты, несмотря на их качественное разнообразие (в некоторых вариантах частицы дымки могут и снижать свою оптическую активность), следует признать, что в целом они, как инородные включения капель, эффективно способствуют увеличению поглощения солнечной радиации в облаках, особенно при значительном их количестве. Последнее обстоятельство, а также угрожающие темпы роста антропогенного влияния убеждают в необходимости последовательного изучения оптического поведения аэрозольной компоненты в радиационном бюджете планеты и учета не только прямого, но и косвенного влияния глобальной

составляющей аэрозольной фазы на преобразование лучистой энергии в общей климатической системе.

1. *Физические основы теории климата и его моделирования* / Под ред. А.С. Монина. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 119 с.
2. *Седунов Ю.С.* Физика образования жидкокапельной фазы в атмосфере. Л.: Гидрометеоздат, 1972. 207 с.
3. *Chylek P., Ramaswamy V. and Cheng R.J.* Effect of graphitic carbon on albedo of clouds // *J. Atmos. Sci.* 1984. V. 41 P. 3-76-3084.
4. *Twomey S.* The Influence of Pollution on the Short Wave Albedo of clouds // *J. Atmos. Sci.* 1977. V. 34. N 7. C. 1149–1152.
5. *Stephens G.L., Si-Chee Tsay.* On the cloud absorption anomaly // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 1990. V. 116. P. 671–704.
6. *Wiscombe W.J., Welch R.M., Hall W.D.* The Effect of very Large Drops on Cloud Absorption. Part I - Parcels Models // *J. Atmos. Sci.* 1984. V. 41. N 8. P. 1336–1355.
7. *Тумов Г.А.* Радиационные эффекты неоднородных слоисто-кучевых облаков: 1. Горизонтальный перенос // *Оптика атмосферы и океана.* 1996. Т. 9. № 10. С. 1295–1307.
8. *Тумов Г.А.* Радиационные эффекты неоднородных слоисто-кучевых облаков: 2. Поглощение // *Оптика атмосферы и океана.* 1996. Т. 9. № 10. С. 1308–1318.
9. *Тарасова Т.А., Фейгельсон Е.М.* Влияние тропосферного аэрозоля на интегральное альbedo системы: облачная атмосфера – подстилающая поверхность // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО.* 1983. Т. 19. № 11. С. 1161.
10. *Тарасова Т.А., Устинов Е.А.* Радиационные потоки в системе облачно-аэрозольная атмосфера и подстилающая поверхность // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО.* 1985. Т. 21. № 4. С. 430–434.
11. *Дейрменджан Д.* Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 165 с.
12. *Розенберг Г.В., Малкевич М.С., Сячинов В.И.* Определение оптических характеристик облачности по измерениям отраженной солнечной радиации со спутника «Космос-320» // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО.* 1974. Т. 10. № 1. С. 14–24.
13. *Креков Г.М., Рахимов Р.Ф.* Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1982. 200 с.
14. *Розенберг Г.В.* Покровная фаза аэрозоля и ее роль в атмосфере // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО.* 1979. Т. 15. № 15. С. 1094–1098.
15. *Twomey S.* Atmospheric Aerosols. New York: Elsevier, 1977. 241 p.
16. *Kerker M.* The scattering of light and other electromagnetic radiation. New York and London: Academic Press, 1969.
17. *Ивлев Л.С., Андреев С.Д.* Оптические свойства атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-е ЛГУ, 1986. 360 с.
18. *Облака и облачная атмосфера* / Под ред. И.П. Мазина, А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 660 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
4 февраля 1998 г.

R.F. Rakhimov. Nonadditive Absorption of Light by Atmospheric Particles Involved into Liquid-Drop Clouds.

Various types of the atmospheric haze particles participation in light absorption by liquid-drop clouds are treated using the model of multilayer, concentrically inhomogeneous liquid drop. Presence of thin moderately absorbing layer of 0.1 % volume within a drop amplifies the efficiency of the absorption by the liquid-drop clouds almost by an order of magnitude. The highest effect of such impurities inclusion is when they are concentrated in the drop center. As they move from the center to the drop surface, their role in the light absorption significantly weakens. The drops with moderately absorbing surface layer are characterized by strongly oscillating dependence $K_a(\beta)$, which for some ρ can exceed the absorbability of similar drops with centered impurities. The estimates made for polydispersion ensemble have shown an effect of nonadditivity of the light absorption by the atmospheric haze particles at various types of their location in a cloud. Being centered within its drops, the impurities absorb the light 1.5–3 times more efficiently than being located within its interdrop space.