

Л.С. Ивлев, И.Н. Мельникова, О.М. Коростина, А.И. Шульц

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЛОИСТОГО ОБЛАКА НА ОСНОВЕ САМОЛЕТНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

На основе аномальной дифракции Ван де Хюлста получены простые формулы, выражающие микрофизические параметры (средний радиус и мнимую часть показателя преломления) через объемные коэффициенты рассеяния и поглощения в случае крупных частиц. Проведена оценка точности формул и их области применимости. Полученные формулы применены к спектральным зависимостям оптических параметров слоистого облака, определенным ранее для четырех радиационных самолетных экспериментов. Определены средний радиус капли слоистого облака для каждого случая и спектральные зависимости мнимой части показателя преломления.

**Введение**

Значения микрофизических параметров реального слоистого облака важны для задач, связанных с исследованием структуры облачности, динамики ее развития, с моделированием облачности, а также для экологического мониторинга загрязнения атмосферы. Основными параметрами облачного аэрозоля с точки зрения радиационных задач являются средний эффективный по сечению радиус частиц облака  $r$  (или средний радиус при известном аналитическом выражении распределения частиц по размерам) и значения мнимой части показателя преломления  $\kappa$ . В работах [1, 2] рассмотрена возможность определения среднего радиуса облачных частиц на основе самолетных измерений интенсивности отраженной солнечной радиации от облачного слоя в ближней ИК-области спектра с использованием статистических методов решения обратных задач.

В настоящей статье для определения  $r$  и  $\kappa$  предлагаются простые формулы, полученные из аппроксимационных выражений теории рассеяния света, предложенных в работе [3] для объемных коэффициентов рассеяния и поглощения. Задача определения микрофизических параметров из данных радиационных измерений разделяется на два основных этапа. Первый этап – получение оптических характеристик облачного слоя (объемных коэффициентов рассеяния и поглощения) – рассмотрен в работах [4, 5], где выведены строгие формулы, выражающие коэффициенты рассеяния и поглощения через измеренные полусферические потоки солнечной радиации на границах облачного слоя, определена точность и область применимости метода и получены оптические параметры слоистой облачности для четырех случаев. Второй этап – определение среднего эффективного по сечению радиуса и мнимой части комплексного показателя преломления – рассматривается ниже.

Исходные формулы. В статье [3] на основе теории аномальной дифракции Ван де Хюлста получены простые, но достаточно точные формулы для расчета коэффициентов ослабления  $\sigma^{\text{ext}}$ , рассеяния  $\sigma^{\text{sc}}$ , поглощения  $\sigma^{\text{abs}}$  и альbedo однократного рассеяния  $\omega_0 = \sigma^{\text{sc}}/\sigma^{\text{ext}}$  в полидисперсных средах с распределением частиц по размерам в виде гамма-распределения. Там же проверена точность полученных формул путем сравнения с расчетами по теории Ми. Эти формулы являются исходными для дальнейшего рассмотрения:

$$\left. \begin{aligned} \sigma^{\text{sc}} &= S [1 + C (1 + B)^{-(p+3)}] \\ \sigma^{\text{abs}} &= S [1 - (1 + B)^{-(p+3)}] \\ \sigma^{\text{abs}} &= 2 S (1 + C/2) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $S$  – эффективная геометрическая площадь на единицу объема;

$$S = \pi r^2 N \frac{p+2}{p+1}, \quad B = \frac{8\pi \kappa r}{\lambda(p+1)}, \quad C = \frac{(p+1)\lambda^2}{(p+2)\pi^2 r^2} \frac{(m-1)^2 - \kappa^2}{[(m-1)^2 + \kappa^2]^2}, \quad (2)$$

где  $m$  – действительная часть показателя преломления;  $p$  – параметр гамма-распределения ( $p = 6$  – «узкое» распределение характерно для облаков нижнего яруса над континентом;  $p = 2$  – «широкое», более типично для фронтальных облаков и облаков над океаном);  $\lambda$  – длина волны падающего излучения;  $N$  – концентрация капель в облаке, согласно [6]  $N > 200$  в континентальных воздушных массах и  $N \approx 50$  в морских. Учитывая, что в выражении для  $C$  в видимом свете величина  $\kappa^2 \sim 10^{-12}$ ,  $\kappa^4 \sim 10^{-24}$ , можно показать, что

$$C = \frac{p+1}{p+2} \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2 (m-1)^2}, \quad (3)$$

тогда из приведенных выражений легко получить формулы, выражающие средний эффективный радиус  $r$  и мнимую часть показателя преломления  $\kappa$  через объемные коэффициенты рассеяния и поглощения.

$$r = \left( \frac{\sigma^{\text{ext}} - N\lambda^2/[4\pi(m-1)^2]p+1}{2\pi N} \right)^{1/2} \frac{p+1}{p+2}; \quad (4)$$

$$\kappa = \frac{\lambda [(1 - \sigma^{\text{abs}}/S)^{-1/(p+3)} - 1]}{8\pi r} (p+1). \quad (5)$$

В случае использования вместо концентрации капель водности облака

$$q = 4/3 N \pi r^3 \rho (p+2)(p+3)/(p+1)^2, \quad (6)$$

где  $\rho$  обозначает плотность вещества частиц (для воды  $\rho = 1$  г/см<sup>3</sup>), формула для среднего радиуса принимает вид

$$r = \frac{1,5 q p + 1}{\sigma^{\text{ext}} \rho p + 3}. \quad (7)$$

При этом для видимого диапазона падающего излучения и размеров капель в облаке  $r > 4$  мкм мы пренебрегли слагаемым  $\sim \lambda^2/r^2 < 0,01$ .

Рассмотрим отношение  $\sigma^{\text{abs}}/S$  в формуле (5). Принимая во внимание выражение для  $\sigma^{\text{ext}}$ , получим с точностью до 0,3%  $\sigma^{\text{abs}}/S = 2(1 - \omega_0)$  и тогда перепишем формулу для  $\kappa$  в виде

$$\kappa = \frac{\lambda [(2\omega_0 - 1)^{-1/(p+3)} - 1]}{8\pi r} (p+1). \quad (8)$$

### Точность восстановления микрофизических параметров

Предложенную процедуру следует рассматривать как решение обратной задачи, точность которого определяется скоростью изменения функций  $\sigma^{\text{ext}}(r)$  и  $\omega_0(\kappa)$ , поэтому формулы, выражающие относительные ошибки восстановления  $r$  и  $\kappa$  через ошибки измеренных или заданных *a priori* величин, получаются дифференцированием основной формулы. Погрешности определения среднего эффективного радиуса рассчитываются по формулам

$$2 \frac{\Delta r}{r} \leq \frac{\Delta \sigma}{\sigma} + \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta p}{p+1}, \quad (9)$$

или в случае использования водности

$$\frac{\Delta r}{r} \leq \frac{\Delta \sigma}{\sigma} + \frac{\Delta q}{q} + \frac{\Delta p}{p+1}. \quad (10)$$

Рассмотрим влияние основных факторов на точность результата:

1)  $\Delta \sigma/\sigma$  – относительная ошибка определения объемного коэффициента ослабления – была оценена в [4, 5] и находится в пределах 10%.

2) Неопределенности в задании априорной информации о концентрации частиц  $N$  и о распределении частиц по размерам, выраженном параметром  $p$ , отражена во 2-м и 3-м слагаемых в формуле (9). Величина  $\Delta p/(p+1) \leq 15\%$ . Ошибка задания  $N$  может достигать 200% и будет являться определяющей для погрешности определения среднего радиуса.

3) Величина  $\Delta q/q$  на высоте  $\sim 1$  км (характерной для слоистых облаков), как следует из данных, приведенных в [6], не превышает 20%. Поэтому для определения среднего радиуса желательно применять формулу (7) и тогда погрешность  $\Delta r/r < 45\%$ .

Погрешности определения мнимой части показателя преломления рассчитываются по следующим формулам:

$$\frac{\Delta \kappa}{\kappa} \leq \frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \frac{\Delta p}{p+1} + \frac{\Delta \omega_0}{\omega_0} \frac{2}{(p+3) [(2\omega_0 - 1)^{-1/(p+3)} - 1]}, \quad (11)$$

$$\frac{\Delta \kappa}{\kappa} \leq \frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \frac{\Delta p}{p+1} + \frac{\Delta \sigma^{\text{abs}} + \sigma^{\text{abs}}/S [2\Delta r/r + \Delta N/N + 2\Delta p/(p+1)]}{S(p+3)(1 - \sigma^{\text{abs}}/S) [(1 - \sigma^{\text{abs}}/S)^{-1/(p+3)} - 1]}. \quad (12)$$

Соответствующий анализ погрешностей в этом случае показывает:

1) погрешность определения мнимой части показателя преломления определяется в первую очередь погрешностью определения среднего радиуса;

2) величина  $\Delta \lambda/\lambda$  достаточно мала при использовании спектральных радиационных измерений с разрешением  $\sim 0,002$  мкм;

3) слагаемое, связанное с погрешностью в величине альбедо однократного рассеяния  $\omega_0$ , имеет в знаменателе малую величину ( $\sim 5 \times 10^{-4}$ ), но и  $\Delta \omega_0$  очень мало ( $\sim 2 \times 10^{-6}$ ) и не вносит большой ошибки в определение величины  $\kappa$ . Оценка величины слагаемого, зависящего от погрешности  $\Delta \sigma^{\text{abs}}$ , дает около 50%. Поэтому для определения величины  $\kappa$  можно рекомендовать использовать формулу (8).

Применяемые формулы получены на основе асимптотик теории рассеяния света на частицах для крупных частиц и асимптотик теории переноса излучения для большой оптической толщины и слабого поглощения. Таким образом, существуют ограничения области применимости и при нарушении этих ограничений ошибки метода сильно возрастают. Для исследования погрешности предлагаемых формул и чувствительности метода к размеру частиц, значению мнимой части показателя преломления и к разным функциям распределения капель по размерам было выполнено численное моделирование измерений потоков солнечного излучения. Рассмотрен следующий набор значений параметров:

1)  $r = 3 \cdot 10$  мкм;  $\kappa = 5 \cdot 10^{-8}$ ,  $5 \cdot 10^{-5}$  в случае монодисперсной среды;

2) для  $r = 10$  мкм исследовались два случая Г-распределений частиц по размерам ( $p = 2,6$ ) и два случая распределений по размерам согласно функции [7]

$$f(r) = ar^{-p} e^{-p r_0/r}, \text{ где } r_0 = r_{\text{max}}. \quad (13)$$

Для указанных вариантов были рассчитаны по формулам Ми оптические параметры  $\sigma^{\text{scat}}$  и  $\sigma^{\text{abs}}$ , послужившие моделью для расчетов полусферических потоков солнечной радиации. Затем был проделан весь путь решения обратной задачи для нахождения среднего эффективного радиуса  $r$  и мнимой части показателя преломления.

В случае монодисперсной среды погрешность восстановления среднего радиуса оказалась  $\Delta r/r \sim 8\%$  при  $r = 3$  мкм и  $4\%$  при  $r = 10$  мкм;  $\Delta \kappa/\kappa \sim 4\%$  при  $\lambda = 0,55$  мкм и  $\Delta \kappa/\kappa \sim 25\%$  при  $\lambda = 1$  мкм.

В случае полидисперсной среды при всех рассмотренных распределениях частиц по размерам оказалось, что лучше всего (с ошибкой  $\sim 4\%$ ) определять средний радиус по формуле для монодисперсной среды (без множителя  $(p+1)/(p+3)$ ). Это очень важное обстоятельство, так как при использовании экспериментальных данных у нас нет сведений о распределении капель в облаке по размерам.

Ошибка определения  $\kappa$  меняется от 3% для Г-распределения с параметром  $p = 6$  до 25% для распределения с  $p = 6$  из работы [7]. Отметим, что при этой проверке число частиц  $N$  было известно и не вносило ошибки в результат.

## Определение микрофизических параметров для реальных слоистых облаков по измерениям потоков солнечной радиации

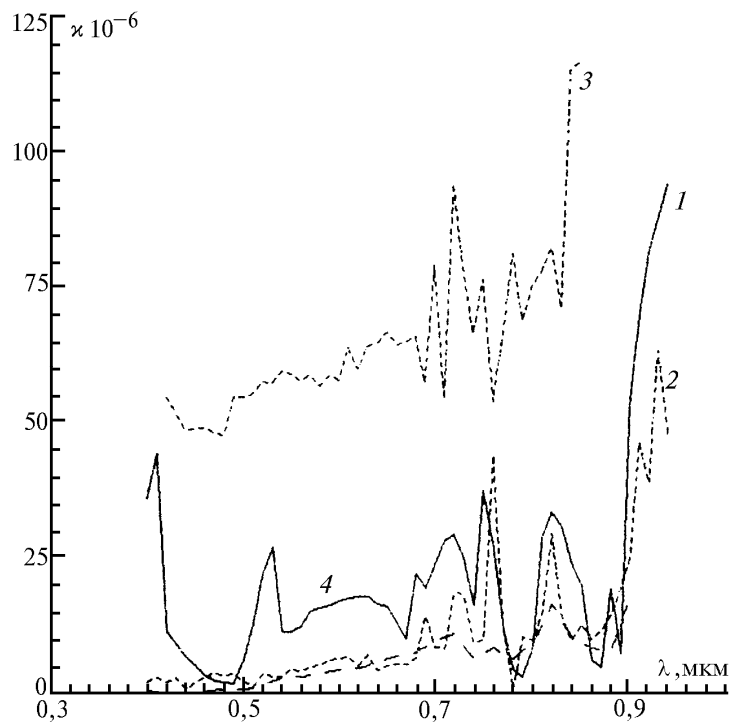
Как упомянуто выше, в работах [4, 5] были получены спектральные зависимости объемных коэффициентов рассеяния и поглощения для четырех экспериментов. Два эксперимента проводились над поверхностью Азовского и Черного морей, третий – над сушей в районе промышленного центра Рустави и четвертый над покрытым льдом Ладожским озером.

Особенностями этих результатов являются весьма значительная спектральная зависимость коэффициента рассеяния и большие величины коэффициента поглощения. Это может объясняться усилением рэлеевского рассеяния на молекулах и поглощения на аэрозольных частицах, находившихся вне капель, в процессе многократного рассеяния солнечной радиации в облаке. Для определения среднего размера капель облака необходимо рассматривать значения коэффициента рассеяния в ближней ИК-области, где уже отсутствует спектральная зависимость. Для этого имеем следующие значения объемного коэффициента рассеяния для определения среднего эффективного радиуса капель:  $\sigma = 40, 39, 6,5$  и  $24 \text{ км}^{-1}$ . В работе [1] также отмечается предпочтительность использования радиационных измерений в ИК-области для определения среднего размера капель облака.

С учетом высоты нижней границы облачности в каждом случае и температуры были выбраны следующие значения влажности:  $q = 0,25; 0,25; 0,2$  и  $0,05 \text{ г/м}^3$  согласно [6].

Таким образом, применяя формулу (7), получим для каждого из 4-х случаев слоистых облаков:  $r = 7,5; 7,3; 8,8$  и  $12,2 \text{ мкм}$  соответственно. В первых двух экспериментах одновременно с радиационными измерениями определялся средний радиус из нефелометрических данных, который равнялся  $6,5 \text{ мкм}$  в обоих случаях, т.е. отличался от полученных здесь величин на  $\sim 15\%$ .

Применение формулы (8) к спектральным значениям альbedo однократного рассеяния приводит к спектральным зависимостям мнимой части показателя преломления, показанным на рисунке. Отметим, что в объемном коэффициенте поглощения не было исключено газовое поглощение, поэтому полученный здесь результат относится не к капле облака, а к малому объему рассеивающей среды, включающему капли, атмосферные газы и сухой аэрозоль. На рисунке явно выделяются полосы поглощения атмосферными газами, но кроме полос газового поглощения видны некоторые другие особенности спектров поглощения, отличающиеся в разных облаках.



Спектральные значения комплексной части показателя преломления

Следует обратить внимание на то, что несмотря на существенно различные воздушные массы и микроструктурные характеристики облаков, выявляются достаточно сходные черты в спектральном ходе  $\kappa(\lambda)$ , обусловленные, вероятно, оптическими константами вещества облачных элементов, и межкапельного воздуха. В спектральной области  $\lambda > 0,7$  мкм заметны линии поглощения кислорода, а в области  $\lambda > 0,9$  мкм – водяного пара. В более коротковолновой области полосы поглощения могут быть вызваны такими газовыми компонентами, присутствующими в атмосфере, как озон и окислы азота. Селективное аэрозольное поглощение в области  $\lambda < 0,7$  мкм вызвано, вероятно, присутствием в веществе аэрозольных частиц окислов железа и титана. Резкие полосы поглощения в коротковолновой части спектра в случае облаков над морской поверхностью, по-видимому, обязаны влиянию F-центров в соединениях щелочных и щелочноземельных металлов, особенно NaCl и KCl, попадающих в атмосферу из морских брызг.

Отметим, что значения  $\kappa$  получились на два порядка выше, чем обычно принимаются в моделях слоистого облака. Как уже отмечалось, в работе [4] предложено объяснение больших значений коэффициента поглощения (которые и приводят к соответственно увеличенным значениям мнимой части показателя преломления) за счет влияния многократного рассеяния света в облаке и предложены эмпирические формулы, учитывающие этот эффект. Если здесь основываться на значениях коэффициента поглощения, подправленного с учетом многократного рассеяния света так, как предложено в работе [4], то порядок значений  $\kappa$  совпадает с общепринятым (что может служить еще одним косвенным свидетельством правильности рассуждений о влиянии многократного рассеяния, приведенных в [4]).

## Заключение

Известно, что прямые измерения микрофизических характеристик облачности, особенно таких как мнимая часть показателя преломления вещества капель  $\kappa$  и дисперсность капель ( $r$ ), представляют большие технические и методические трудности, в частности из-за постоянной изменчивости этих характеристик как в облаке, так и в процессе их измерений. Погрешности прямого измерения  $r$  не меньше 20%, а  $\kappa$  – 30-40%. Полученные по предлагаемой выше методике определения этих характеристик из оптических измерений для различных модельных случаев имеют более высокую точность: от 4% для обеих величин до 18% для  $r$  и 25% для  $\kappa$ . Причем в этом случае отсутствует неконтролируемое воздействие экспериментатора на дисперсную среду, а результаты по определяемым характеристикам могут быть получены непосредственно в процессе эксперимента.

Применение метода для определения  $r$  и  $\kappa$  к данным оптических экспериментов в различных условиях дало результаты, согласующиеся по среднему размеру частиц с параллельно выполненными измерениями, а также с данными прямых измерений в типичных слоистых облаках [6]. Получена неизвестная ранее зависимость  $\kappa(\lambda)$  для видимой и ближней инфракрасной области спектра. Детальное изучение и интерпретация  $\kappa(\lambda)$  для разных условий эксперимента представляют для авторов особый интерес и будут обсуждены в последующих публикациях.

Авторы выражают благодарность Ю.М. Тимофееву за плодотворное обсуждение результатов работы.

1. Nakajima T., King M.D. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part. I: Theory // Jour. Atmos. Sci. 1990. V. 47. N 15. P. 1878–1893.
2. Reagan J.A., Byrne D.M., King M.D., Spinhirne J.D., Herman B.M. Determination of the complex refractive index and size distribution of atmospheric particulates from bistatic-monostatic lidar and solar radiometer measurements // Jour. Geop. Res. 1980. V. 85. N C3. P. 1591–1599.
3. Хворостьянов В.И., Хворостьянов Д.В. Аналитический метод расчета оптических параметров полидисперстных сред и его применение для перистых облаков // Изв. РАН. Сер. ФАО. 1994. Т. 30. N 3. С. 293–300.
4. Мельникова И.Н. Спектральные оптические параметры облачных слоев. Приложение к экспериментальным данным. Часть II // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 2. С. 178–185.
5. Melnikova I.N., Mikhailov V.V. Spectral scattering and absorption coefficients in strati derived from aircraft measurements // Jour. Atmos. Sci. 1994. V. 51. N 4. P. 1632–1639.
6. Облака и облачная атмосфера. Справочник / Под ред. И.П. Мазина и А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 647 с.
7. Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 366 с.
8. Ивлев Л.С., Мельникова И.Н. О точности определения микрофизических параметров слоистого облака из радиационных измерений. Тезисы 2-го Межреспубликанского симпозиума «Оптика атмосферы и океана». Томск, июнь 1995.

L. S. Ivlev, I. N. Melnikova, O. M. Korostina, A. I. Shults. **Determination of the Strati Microphysical Parameters Based on the Radiation Measurements by the Airborne Instrumentation.**

The simple formulas expressing the microphysical parameters (particle mean radius and imaginary part of the complex refraction index) through the volume scattering and absorption coefficients were derived based on the Van de Hulst anomalous diffraction theory for the case of large particles. The accuracy and the applicability region of the formulas was estimated. The formulas derived were used in determination of the spectral dependencies of the strati optical parameters, earlier obtained in four experiments conducted by means of airborne instrumentation.

The mean radius of the stratus drops was found for each case as well as the spectral dependencies of the refraction index imaginary part.