

А. Пихл, Р. Рыым

### О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЕРЕБРИСТЫХ И МЕЗОСФЕРНЫХ ОБЛАКОВ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО СУМЕРЕЧНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИЗ КОСМОСА

Рассмотрено определение микрофизических параметров — среднего радиуса и среднеквадратического отклонения функции распределения рассеивателей — по данным дистанционного зондирования горизонта из космоса в сумеречных условиях. Найдено, что оптимальной измеряемой величиной является показатель цвета. Одновременное измерение двух показателей цвета позволяет оценить радиус и дисперсию частиц. В области малых и средних частиц ( $0,01 \mu\text{м} < \bar{r} < 0,08 \mu\text{м}$ ) показатель цвета более чувствителен к вариациям полуширины функции распределения и относительно слабо зависит от среднего радиуса рассеивателей.

Метод сумеречного зондирования горизонта впервые был предложен в работах Розенберга [1] и Розенберга и Терешковой [2], а подробное математическое развитие получил в работах Кондратьева, Бузника и Покровского [3,4]. Для исследования серебристых и мезосферных облаков (СО и МО) такой метод является особенно подходящим, так как в сумеречных условиях для наблюдателя в космосе эти облака выделяются ярким слоем на более темном фоне. Данные с оптического зондирования СО и МО могут быть использованы для определения физических параметров частиц, причем в расчетах можно ограничиваться приближением однократного рассеяния.

Между компонентами вектора Стокса рассеянного излучения и микрофизическими параметрами рассеивающих частиц в приближении однократного рассеяния теория переноса излучения устанавливает связь в виде

$$\frac{4\pi I_{\lambda}^j}{c_{\lambda}} \exp(T_{\lambda}) \equiv A_{\lambda}^j(\gamma) = N S_{\lambda} g_{\lambda}^j S(\gamma). \quad (1)$$

Здесь  $I_{\lambda}^j$ ,  $j = 1, 2$  — компоненты вектора Стокса измеренного наблюдателем излучения, так что  $I_{\lambda} = I_{\lambda}^1 + I_{\lambda}^2$  — интенсивность;  $P_{\lambda} = (I_{\lambda}^1 - I_{\lambda}^2) / (I_{\lambda}^1 + I_{\lambda}^2)$  — степень поляризации;  $c_{\lambda}$  — спектральная солнечная постоянная;  $N$  — количество частиц в столбе с единичным сечением вдоль линии визирования;  $S_{\lambda}$  — поперечное сечение рассеяния одной частицы;  $g_{\lambda}^i$  — компоненты фазовой матрицы рассеяния, так что сумма  $g_{\lambda}^1(\gamma) + g_{\lambda}^2(\gamma) = g_{\lambda}(\gamma)$  является фазовой функцией рассеяния;  $\gamma$  — угол рассеяния. Величина  $T_{\lambda}$  представляет эффективную оптическую толщину атмосферы от Солнца до рассеивающих частиц СО и определяется соотношением

$$\exp(-T_{\lambda}) = \frac{1}{L} \int \exp[-\tau(l)] dl, \quad (2)$$

где интегрирование происходит вдоль линии визирования;  $\tau(\lambda)$  — оптическая толщина от Солнца до точки с координатой  $l$ ;  $L$  — протяженность облака вдоль линии визирования.

Если компоненты  $I_{\lambda}^j$  (или некоторые линейные комбинации их) известны и известна оптическая толщина  $T_{\lambda}$ , то формулу (1) можно использовать для определения справа стоящей величины, а значит, и для оценки микрофизических параметров рассеивателей. Таким образом, первым и наиболее ответственным шагом при интерпретации данных космического сумеречного зондирования является надежное моделирование эффективной оптической толщины  $T_{\lambda}$ . Оптическая толщина  $T_{\lambda}$  оценивалась нами на основе модельных расчетов, принимались во внимание рефракция и конечность углового диаметра Солнца. На рис. 1 приведены результаты таких расчетов для трех длин волн в зависимости от азимута линии визирования и угла погружения Солнца под горизонт. Рассмотрено три случая: 1) атмосфера без рефракции; 2) с рефракцией, но с «точечным» Солнцем, 3) с рефракцией и конечным угловым диаметром Солнца. Расчет аэрозольного и рэлеевского рассеяния и ослабления был проведен на основе модели [5], а поглощение озоном — на основе модели [6].

На основе модельных расчетов (см. рис. 1) можно сделать следующие выводы:

1. В УФ области спектра ( $\lambda = 0,3 \mu\text{м}$ ) метод сумеречного зондирования СО и МО из космоса целесообразен при малых углах погружения Солнца под горизонт ( $\alpha < 3^{\circ}$ ). При более больших углах солнечное излучение полностью поглощается нижней плотной атмосферой и озоновым слоем, вследствие чего влияние рефракции на формирование  $T_{\lambda}$  незначительно (при  $T_{\lambda} \leq 1$ ).

2. В видимой области спектра ( $\lambda = 0,55 \mu\text{m}$ ) метод можно использовать в диапазоне углов погружения  $0^\circ < \alpha < 5^\circ$ , рефракция, равно как и конечные угловые размеры Солнца, на величину  $T_\lambda$  значимого влияния не оказывает.

3. В ИК области спектра ( $\lambda = 0,86 \mu\text{m}$ ) погружение Солнца допускается до углов  $6-7^\circ$  ниже горизонта Земли. Край видимого диска Солнца мало влияет на  $T_\lambda$ , но учет рефракции необходим.

4. Достоверное восстановление микрофизических параметров СО и МО возможно при условии  $T_\lambda \leq 1$  — в области  $T_\lambda > 1$  восстановление будет существенно зависеть от выбора модели нижней атмосферы, кроме того становится некорректным использовать приближение однократного рассеяния.

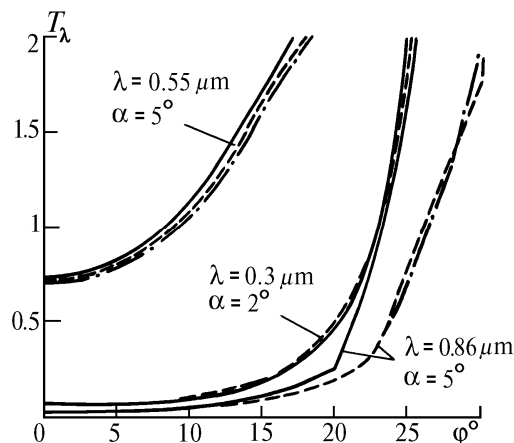


Рис. 1. Зависимость оптической толщины  $T_\lambda$  от азимута линии визирования  $\phi$  и угла погружения Солнца  $\alpha$  под горизонт. Модели: сплошные линии — атмосфера без рефракции; штриховые — с рефракцией. Солнце «точечное»; штрихпунктирные — с рефракцией и конечным угловым диаметром Солнца

При известных  $I_\lambda^j$  и  $T_\lambda$  формулу (1) можно использовать для определения микрофизических параметров рассеивающих частиц. В СО, где частицы являются ледяными, и вследствие крайней малости имеют приблизительно шаровую сферическую форму, наиболее важными микрофизическими характеристиками рассеивателей являются средний радиус  $\bar{r}$  и среднеквадратическое отклонение  $d = \sqrt{D}$  ( $D$  — дисперсия) частиц. Поэтому формулу (1) можно записать в виде

$$A_\lambda^j(\gamma) = N S_\lambda(\bar{r}, d) g_\lambda^j(\gamma, \bar{r}, d), \quad (3)$$

где поперечное сечение  $S_\lambda(r, d)$  и матрица рассеяния  $g_\lambda^j(\gamma, \bar{r}, d)$  являются известными функциями  $\bar{r}$  и  $d$ , значения которых можно вычислять, используя решение Ми [7]. В настоящей работе  $S_\lambda$  и  $g_\lambda^j$  моделировались при помощи логарифмически нормального распределения частиц по размерам, однако полученные результаты справедливы также для близких к нормальному распределений с теми же  $\bar{r}$  и  $d$ , так как оптические свойства полидисперсного ансамбля малочувствительны к тонким деталям распределения.

В принятой нами модели СО  $A_\lambda^j(\gamma)$  определяются значениями параметров —  $N$ ,  $\bar{r}$  и  $d$ , и для нахождения этих параметров нужно провести по меньшей мере три независимых измерения компонентов вектора  $A$ . В практике целесообразно определить сначала  $r$  и  $d$ , используя для этого два независимых значения безразмерных комбинаций типа  $A_{\lambda_1}^i(\gamma_1) / A_{\lambda_2}^i(\gamma_2)$ , а затем при известных  $r$  и  $d$  определить  $N$  уже из соотношения (3). В качестве таких безразмерных комбинаций разумно использовать либо показатель цвета, определяемый соотношением интенсивностей в заданном направлении ( $\gamma$ ) на двух выбранных длинах волны

$$C_{\lambda_1\lambda_2}(\gamma) \equiv \frac{A_{\lambda_1}^1(\gamma) + A_{\lambda_1}^2(\gamma)}{A_{\lambda_2}^1(\gamma) + A_{\lambda_2}^2(\gamma)} = \frac{S_{\lambda_1}(\bar{r}, d) g_{\lambda_1}(\gamma, (\bar{r}, d))}{S_{\lambda_2}(\bar{r}, d) g_{\lambda_2}(\gamma, (\bar{r}, d))}, \quad (4)$$

либо степень поляризации

$$P_\lambda(\gamma) \equiv \frac{A_\lambda^1(\gamma) - A_\lambda^2(\gamma)}{A_\lambda^1(\gamma) + A_\lambda^2(\gamma)} = \frac{g_\lambda^1(\gamma, \bar{r}, d) - g_\lambda^2(\gamma, \bar{r}, d)}{g_\lambda^1(\gamma, \bar{r}, d) + g_\lambda^2(\gamma, \bar{r}, d)}. \quad (5)$$

В задачах дистанционного зондирования часто используют также фактор асимметрии, определяемый соотношением интенсивностей, рассеянных в двух различных направлениях. Однако при сумеречном зондировании из космоса слой СО редко является настолько однородным, чтобы количество частиц  $N$  вдоль линии визирования можно было считать постоянной величиной для различных направлений. Поэтому применение фактора асимметрии в данном случае нецелесообразно.

Нами проведено моделирование показателей цвета  $C_{\lambda_1\lambda_2}(30^\circ)$ ,  $C_{\lambda_3\lambda_4}(30^\circ)$  и степеней поляризации  $P_{\lambda_1}(30^\circ)$ ,  $P_{\lambda_2}(30^\circ)$  как функций  $\bar{r}$  и  $d$ , причем  $\lambda_1 = 0,3 \mu\text{м}$ ,  $\lambda_2 = 0,55 \mu\text{м}$ ,  $\lambda_3 = 1,0 \mu\text{м}$ ,  $\lambda_4 = 2,25 \mu\text{м}$ . При моделировании имело место соотношение  $d \leq \bar{r}$ , так как большие значения дисперсии не соответствуют физическим распределениям. Рис. 2 иллюстрирует зависимость показателя цвета  $C_{\lambda_1\lambda_2}(30^\circ)$  от параметров  $\bar{r}$  и  $d$ . Представленная на этом рисунке зависимость является типичной для показателей цвета.

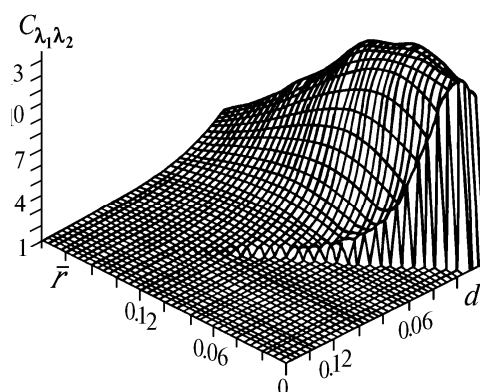


Рис. 2. Показатель цвета  $C_{\lambda_1\lambda_2}(\gamma)$  функции параметров  $\bar{r}$  и  $d$  —  $\lambda_1 = 0,3 \mu\text{м}$ ,  $\lambda_2 = 0,55 \mu\text{м}$  и  $\gamma = 30^\circ$

Для однозначного определения  $\bar{r}$  и  $d$  из двух независимых значений показателей цвета  $C_{\lambda_1\lambda_2}(\gamma)$  и  $C_{\lambda_3\lambda_4}(\gamma)$  необходимо, чтобы соответствующие поверхности не совпадали или не были слишком близкими. Это требование равносильно условию, чтобы изолинии  $C_{\lambda_1\lambda_2}$  и  $C_{\lambda_3\lambda_4}$  на плоскости  $(\bar{r}, d)$  не совпадали и не были параллельными. Ход изолиний  $C_{\lambda_1\lambda_2}(30^\circ)$  и  $C_{\lambda_3\lambda_4}(30^\circ)$  в представлен на рис. 3. На основе этого рисунка можно сделать следующие выводы:

- в области малых частиц ( $\bar{r} < 0,08 \mu\text{м}$ ) показатель цвета в основном определяется шириной функции распределения и мало зависит от среднего рисунка частиц;
- при  $r > 0,08 \mu\text{м}$  одновременное измерение  $C_{\lambda_1\lambda_2}$  и  $C_{\lambda_3\lambda_4}$  позволяет в пределах погрешности измерения определить средний радиус и среднеквадратическое отклонение частиц достаточно надежно.

Нами был также исследован ход изолинии показателей цвета другой комбинации длин волн —  $\lambda_1 = 0,3 \mu\text{м}$ ,  $\lambda_2 = 0,55 \mu\text{м}$ ,  $\lambda_3 = 0,55 \mu\text{м}$ ,  $\lambda_4 = 1,0 \mu\text{м}$ . В этом случае изолинии оказались более близкими к параллельным, чем в приведенном на рис. 3 примере, и восстановление параметров  $r$  и  $d$  при таком выборе длин волн было бы более неопределенным. Надо отметить, что уменьшение угла рассеяния от  $30$  до  $10^\circ$  приводит к аналогичному результату: изолинии становятся более близкими к параллельным и пересекаются лишь в области малых  $d$ .

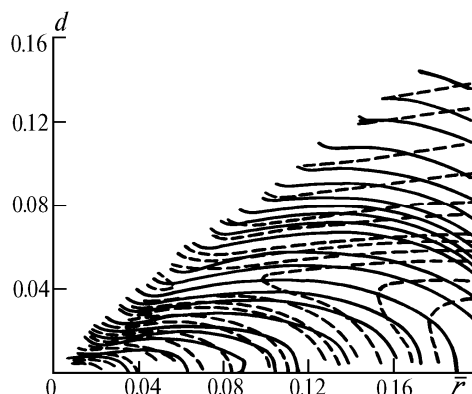


Рис. 3. Изолинии показателей цвета  $C_{\lambda_1\lambda_2}(\gamma)$  и  $C_{\lambda_3\lambda_4}(\gamma)$  на плоскости  $(\bar{r}, d)$  —  $\lambda_1 = 0,3 \mu\text{м}$ ,  $\lambda_2 = 0,55 \mu\text{м}$ ,  $\lambda_3 = 1,0 \mu\text{м}$ ,  $\lambda_4 = 2,25 \mu\text{м}$ . Сплошные линии соответствуют  $C_{\lambda_1\lambda_2}$

На рис. 4 приведены изолинии показателя цвета  $C_{\lambda_1\lambda_2}$  и степени поляризации  $P_{\lambda_1}$ . Видно, что на большей части рисунка изолинии  $C$  и  $P$  параллельны. Это позволяет сделать вывод, что степень поляризации не вносит для определения параметров функции распределения частиц СО и МО по сравнению с показателем цвета новой информации.

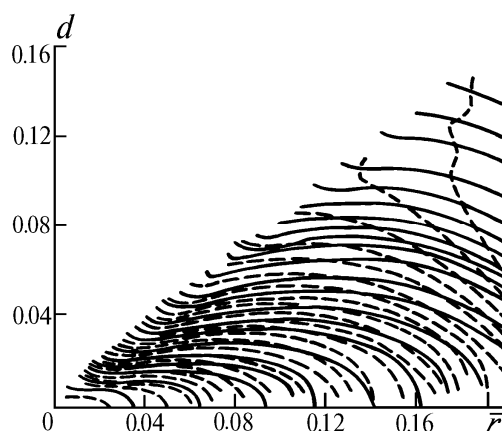


Рис. 4. Изолинии показателя цвета  $C_{\lambda_1\lambda_2}(\gamma)$  и степени поляризации  $P_{\lambda_1}$  на плоскости  $(\bar{r}, d)$  —  $\lambda_1 = 0,3 \mu\text{м}$ ,  $\lambda_2 = 0,55 \mu\text{м}$ ,  $\gamma = 30^\circ$ . Штриховые линии соответствуют  $P_{\lambda_1}$

Подводя итоги проведения модельных расчетов по восстановлению микрофизических параметров — среднего радиуса и среднеквадратического отклонения частиц СО и МО — можно сделать следующие выводы:

1. При планировании эксперимента сумеречного зондирования надо учитывать, что оптические толщины трасс существенно зависят как от длины волны, так и от азимута линии визирования, поэтому допустимые углы погружения Солнца под горизонт в УФ-области ( $0,3 \mu\text{м}$ )  $\alpha \leq 3^\circ$ , в видимой ( $0,55 \mu\text{м}$ )  $\alpha \leq 5^\circ$ , а в ИК-области ( $0,86 \mu\text{м}$ )  $\alpha \leq 6^\circ$ .

2. При обработке полученных данных необходимо тщательно учитывать ослабление солнечных лучей в нижней атмосфере; при значениях оптической толщины  $T_\lambda \leq 1$  учет рефракции и конечности углового диаметра Солнца в УФ и в видимой части спектра не требуется, однако в ИК-области рефракцию учитывать необходимо.

3. Оптические свойства СО существенно зависят как от среднего радиуса частиц  $\bar{r}$ , так и от среднеквадратического отклонения  $d$ , поэтому при интерпретации данных измерений необходимо учитывать оба параметра.

4. С точки зрения определения  $\bar{r}$  и  $d$  самым подходящим и информативным является использование двух значений показателя цвета одного в УФ и в видимой, другого в ИК-области спектра.

5. Применение степени поляризации для определения параметров распределения в сумеречных условиях нецелесообразно по двум причинам:

— изолинии степени поляризации показателя цвета на большей части плоскости  $(\bar{r}, d)$  являются параллельными, вследствие чего невозможно одновременное определение обоих параметров функции распределения;

— качественное измерение поляризации из космоса затруднено, так как значения степени поляризации в области солнечного ореола очень малы.

1. Розенберг Г. В. Сумерки. М.: Физматгиз, 1963. 380 с.
2. Розенберг Г. В., Николаева-Терешкова В. В. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1965. Т. 1. № 4. С. 386–394.
3. Кондратьев К. Я., Бузников А. А., Покровский О. М. // Докл. АН СССР. 1977. Т. 235. № 1. С. 53–56.
4. Исследование природной среды с пилотируемых орбитальных станций / Под ред. К. Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 399 с.
5. A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation. Radiation Commission IAMAP. Boulder, Colorado. 1984. P. 53.
6. Атмосферный озон и изменения глобального климата / Александров З. Л., Кароль И. Л., Ракипова Л. Р. и др. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 168 с.
7. Deirmendjian D. Electromagnetic Scattering on Spherical Polydispersions. New York: Elsevier, 1969. P. 292.

Институт астрофизики и физики атмосферы  
АН Эстонии, Тярввере

Поступила в редакцию  
24 апреля 1992 г.

**A. Pihl, R. Room. On the Possibility of Determination of Microphysical Parameters of Noctilucent and Mesospheric Clouds from Twilight Remote Sensing Measurements from Space**

A possibility of determining microphysical parameters, i. e., the mean radius and root-mean square deviation of the distribution function of scatterers using the data of twilight remote sensing is discussed. It is shown that colour index is an optimal parameter to be measured. Simultaneous measurements of two different colour indices enable one estimate the mean radius and variance of the particles size. In the region of small and medium particles ( $0,01 \mu\text{m} < \bar{r} < 0,08\mu\text{m}$ ) colour index is more sensitive to variations of the width of the distribution while being less sensitive to the mean radius of scatterers.