

И.Н. Мельникова, П.И. Домнин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОДНОРОДНОГО ОПТИЧЕСКИ ТОЛСТОГО ОБЛАЧНОГО СЛОЯ

Получены строгие аналитические формулы для определения оптической толщины и альbedo однократного рассеяния облачного слоя из измерений интенсивности или потоков отраженного от слоя или прошедшего сквозь слой солнечного излучения. Проведен подробный анализ погрешностей предложенного метода. Полученные формулы применимы к спектральным измерениям солнечной радиации в условиях сплошной облачности, выполненным в Арктике на дрейфующей станции СП-22 летом 1979 г. Значения оптической толщины и альbedo однократного рассеяния обнаруживают ярко выраженную спектральную зависимость.

Обнаруженное в последние годы «избыточное» поглощение облаками (особенно слоистых форм) солнечной радиации в коротковолновой области спектра может значительно влиять на энергетический и динамический режим атмосферы, и это обстоятельство предъявляет повышенные требования к адекватности моделей облачности, используемых в задачах прогноза [1]. До сих пор оптические и радиационные модели облачности основывались на теоретических расчетах с использованием теории Ми и теории переноса излучения, но упомянутое выше избыточное («аномальное») поглощение в облаках пока не находит удовлетворительного объяснения в рамках такого подхода. По этим причинам задача определения оптических свойств реальных слоистых облаков особенно актуальна в настоящее время. Было показано, что самолетные измерения солнечной радиации на границах и внутри облачного слоя оказались весьма эффективны для определения оптических параметров (коэффициентов рассеяния и истинного поглощения) облака [2].

В данной статье предлагается аналитический метод определения оптической толщины и альbedo однократного рассеяния горизонтально протяженного и однородного слоя облаков на основе измерений отраженной радиации (спутниковые измерения) или пропущенной радиации (наземные измерения). Основные ограничения налагаются при этом на пространственную однородность поля облаков и их стабильность во времени.

Следует подчеркнуть, что интерпретация радиационных наблюдений, основанная на теории переноса излучения, требует проведения спектральных измерений. При этом можно использовать измерения полусферических нисходящих и восходящих потоков излучения или измерения интенсивности. Реализация метода основана на асимптотических формулах теории переноса [3], представляющих строгое решение уравнения переноса излучения для рассеивающих сред с большой оптической толщиной (характерной для слоистой облачности).

Модель слоистого облака и основные формулы. Рассмотрим модель облачного слоя, бесконечного и однородного в горизонтальном направлении, большой оптической толщины $\tau \gg 1$. На верхнюю границу слоя падает параллельный поток солнечного излучения πS под углом $\arccos \zeta$. Интенсивность отраженного и пропущенного излучения наблюдается под углом визирования $\arccos \eta$.

Рассеивающие и поглощательные свойства облачного слоя описываются следующими оптическими параметрами: оптической толщиной слоя – τ ; альbedo однократного рассеяния (или вероятностью выживания кванта) – ω_0 и индикатрисой рассеяния, которая характеризуется параметром вытянутости (средним косинусом) – g . Облачный слой опирается на подстилающую поверхность с альbedo A . Рассеянием света в слое между поверхностью Земли и облачным слоем пренебрегаем. Относительные интенсивности отраженной и пропущенной слоев радиации описываются коэффициентами отражения $\rho(\tau, \eta, \zeta)$ и пропускания $\sigma(\tau, \eta, \zeta)$, которые выражаются для оптически толстого слоя асимптотическими формулами теории переноса излучения:

$$\rho(\tau, \eta, \zeta) = \rho_\infty(\eta, \zeta) - \frac{M \bar{N} u(\eta) u(\zeta) e^{-2k\tau}}{1 - N \bar{N} e^{-2k\tau}}; \quad \sigma(\tau, \eta, \zeta) = \frac{M \bar{u}(\eta) u(\zeta) e^{-k\tau}}{1 - N \bar{N} e^{-2k\tau}}, \quad (1)$$

где $\rho_\infty(\eta, \zeta)$ – коэффициент отражения полубесконечной среды; функция $u(\zeta)$ описывает угловую зависимость интенсивности радиации; величины M , N и k – константы, определяемые свойствами рассеивающего слоя и в случае слабого (по сравнению с рассеянием) истинного поглощения ($1 - \omega_0 \ll 1$, что характерно для рассеяния света в облаке в видимой области спектра) описываются разложениями по малому параметру s , где $s^2 = (1 - \omega_0)/[3(1 - g)]$.

Отражение света подстилающей поверхностью с альбедо A учитывается членами, обозначенными чертой сверху и описанными в [3].

Пусть измеряется отраженная интенсивность радиации ρ_1 и ρ_2 при двух углах визирования η_1 и η_2 . Применяя первую из формул (1) для двух значений η , рассматривая отношение $(\rho_\infty(\eta_1, \zeta) - \rho_1)/(\rho_\infty(\eta_2, \zeta) - \rho_2)$ (далее для сокращения записи аргументы у измеряемых величин не обозначаются) и привлекая известные разложения по малому параметру s для функций $\rho_\infty(\eta_1, \zeta)$, $u(\zeta)$ и $a(\zeta)$

$$\begin{aligned} u(\zeta) &= u_0(\zeta) (1 - 1,5\delta s) + u_2(\zeta) s^2 + \dots \\ a(\zeta) &= 1 - 4 u_0(\zeta) s + a_2(\zeta) s^2 + \dots \\ \rho_\infty(\eta, \zeta) &= \rho_0(\eta, \zeta) - 4 u_0(\zeta) u_0(\eta) s + \rho_2(\eta, \zeta) s^2 + \dots, \end{aligned} \quad (2)$$

где $u_2(\zeta) = Q_2 u_0(\zeta) w(\zeta)$ и $w(\zeta) = \zeta^2 + 0,43$, получим выражения для величин s^2 и $\tau' = 3(1 - g)\tau$:

$$\begin{aligned} s^2 &= \frac{[\rho_0(\eta_1, \zeta) - \rho_1] u_0(\eta_2) - [\rho_0(\eta_2, \zeta) - \rho_2] u_0(\eta_1)}{[\rho_0(\eta_2, \zeta) - \rho_2] (w(\eta_1) - w(\eta_2)) Q_2 - \frac{a_2(\zeta)}{6\delta} [u_0(\eta_1) a_2(\eta_2) - u_0(\eta_2) a_2(\eta_1)]}; \\ \tau' &= (2s)^{-1} \ln \left\{ \frac{M \bar{N} u(\eta_1) u(\zeta)}{\rho_\infty(\eta_1, \zeta) - \rho_1} + N \bar{N} \right\}. \end{aligned} \quad (3)$$

В эти формулы входят только измеряемые величины ρ_1 и ρ_2 и значения функции $u_0(\zeta)$ при фиксированных углах ζ , η_1 и η_2 , которые можно определить из таблиц [3, 4] или рассчитать по формулам [5]. Предложенный способ определения оптических параметров облачного слоя может оказаться весьма полезным при интерпретации спутниковых измерений отраженной солнечной радиации.

В случае интерпретации наземных наблюдений интенсивности пропущенной солнечной радиации использование аналогичной методики приводит к следующим выражениям для s^2 и τ' :

$$s^2 = \left[\frac{\sigma_1 \bar{u}_0(\eta_2)}{\sigma_2 \bar{u}_0(\eta_1)} - 1 \right] \frac{1}{(w(\eta_1) - w(\eta_2)) Q_2}; \quad \tau' = s^{-2} \ln \left[\left(\sqrt{\frac{r^2}{N \bar{N}} + 1} + 1 \right) / r \right],$$

где

$$r = \frac{2 \sigma_1 N \bar{N}}{M \bar{u}(\eta_1) u(\zeta)}. \quad (4)$$

Отметим, что здесь для определения величины s^2 достаточно измерений потока пропущенной радиации в относительных единицах, а при восстановлении значений оптической толщины требуются радиационные измерения в единицах потока солнечной радиации, падающей на верхнюю границу атмосферы, и поэтому необходима калибровка прибора по прямой солнечной радиации в условиях безоблачной атмосферы.

Погрешности и область применимости. Формулы для погрешностей можно получить, как и для погрешностей косвенных измерений, последовательным логарифмированием и дифференцированием основных формул. При интерпретации измерений пропущенной радиации формула для погрешности ds/s имеет вид

$$\frac{ds}{s} = \frac{d\sigma \bar{u}_0(\eta) + \sigma d\bar{u}_0}{\sigma_1 \bar{u}_0(\eta_2) - \sigma_2 d\bar{u}_0(\eta_1)} + \frac{d\sigma}{2\sigma} + \frac{d\bar{u}_0}{2\bar{u}_0} + \frac{2 d w(\eta) Q_2 + d Q_2 (w(\eta_1) + w(\eta_2))}{Q_2^2 (w(\eta_1) + w(\eta_2))^2}. \quad (5)$$

Выражение для относительной погрешности оптической толщины получено аналогично из основной формулы для τ

$$\frac{d\tau}{\tau} = \frac{ds}{s} + \frac{1}{\tau} \left\{ \frac{dr}{r} + \left[\frac{r^2}{N\bar{N}} \left(2 \frac{dr}{r} + \frac{dN}{N} + \frac{d\bar{N}}{\bar{N}} \right) \right] \sqrt{2 \sqrt{\frac{r^2}{N\bar{N}} + 1} \left(\sqrt{\frac{r^2}{N\bar{N}} + 1} + 1 \right)} \right\}, \quad (6)$$

где, учитывая соотношение (4), имеем

$$\frac{dr}{r} = \frac{d\sigma}{\sigma} + \frac{dN}{N} + \frac{d\bar{N}}{\bar{N}} + \frac{dM}{M} + \frac{d\bar{u}}{u} + \frac{du}{u}. \quad (7)$$

Погрешности вычисления N , M и функции $u(\zeta)$ определяются величиной отбрасываемых в асимптотических разложениях членов $\sim s^3$.

Погрешности вычисления значений функций $w(\zeta)$ и $a_2(\zeta)$ рассчитываются по формулам

$$dw = \frac{\eta d\eta}{\eta + 0,2}; \quad da_2 = 3 du_0 a_2 + \frac{9 dgu_0}{(1+g)^2} + \frac{9 gu_0}{(1+g)} d\eta. \quad (8)$$

Численный анализ показывает, что в формуле (5) наибольший вклад дают первое и последнее слагаемые. Уменьшить их можно выбором оптимальных пар углов η_1, η_2 .

Для повышения точности следует использовать 2–3 пары углов и вычислять среднее значение величины s . Следует подчеркнуть, что измерения пропущенного излучения под несколькими углами визирования полезно для контроля однородности и большой оптической толщины исследуемого облачного слоя, так же как и измерения под несколькими азимутальными углами. Отсутствие азимутальной зависимости пропущенного излучения и зависимость от угла визирования, качественно соответствующая функции $u(\eta)$, указывают на горизонтальную однородность облачного слоя и на его большую оптическую толщину, что позволяет применять предлагаемый здесь метод. Численные оценки слагаемых в формуле (6) показывают сильное влияние альбедо подстилающей поверхности на точность определения оптической толщины. В этом случае измерения, проведенные в нескольких направлениях визирования, заметно уменьшают погрешность восстановления τ . В общем случае оказывается $d\tau/\tau \approx 10\text{--}25\%$ при погрешности измерений около 2% и альбедо поверхности от 0,5 до 0,9.

Отметим, что погрешности определения величин s и ω_0 связаны между собой соотношением $d\omega_0/\omega_0 = (6sds(1-g) + 3dgs^2)/(1-3s^2(1-g))$, тогда получается $d\omega_0/\omega_0 \sim 0,0001\text{--}0,0007$. Дело в том, что значение величины ω_0 с точностью первых 2–3 знаков после запятой известно *a priori*, что определяет так называемую «априорную погрешность». Поэтому приведенное значение $d\omega_0/\omega_0$ указывает, что 3-й и 4-й знаки после запятой в значении величины ω_0 определяются с погрешностью $\sim 5\text{--}10\%$.

Интерпретация данных измерений полусферических потоков отраженного или пропущенного излучения. Применение данных измерений потоков, выполненных в разные моменты времени (при различных зенитных углах Солнца ζ_1 и ζ_2), приводит в случае *отраженного потока* к выражениям

$$s^2 = \frac{\{(a(\zeta_1) - F_1^\uparrow) u_0(\zeta_2) / [(a(\zeta_2) - F_2^\uparrow) u_0(\zeta_1)] - 1\}}{(w(\eta_1) - w(\eta_2)) Q_2}; \quad \tau' = \frac{1}{2s} \ln \left\{ \frac{M \bar{N} Q u(\zeta)}{a(\zeta) - F^\uparrow} + N \bar{N} \right\} \quad (9)$$

и в случае *пропущенного потока*

$$s^2 = \frac{\{F_1^\downarrow u_0(\zeta_2) / [F_2^\downarrow u_0(\zeta_1)] - 1\}}{(w(\eta_1) - w(\eta_2)) Q_2}; \quad \tau' = s^{-1} \ln \left[\frac{\sqrt{r^2/(N\bar{N}) + 1} + 1}{r} \right], \quad (10)$$

где введена величина $r = 2 F^\downarrow N \bar{N} / (M \bar{Q} u(\zeta))$.

В данном случае для определения величины s^2 достаточно измерений потока пропущенной радиации в относительных единицах, а при восстановлении значений оптической толщины требуются радиационные измерения в единицах потока солнечной радиации, падающей на верхнюю границу атмосферы, и поэтому необходима калибровка прибора по прямой солнечной радиации в условиях безоблачной атмосферы.

В основе всех полученных результатов лежат асимптотические формулы теории переноса излучения, которые имеют ограниченную область применимости – оптическая толщина слоя должна быть не меньше 10–15, и асимптотические разложения по малому параметру s , которые накладывают ограничения на истинное поглощение в слое (величина вероятности выживания кванта должна быть в пределах $\omega_0 \geq 0,98$).

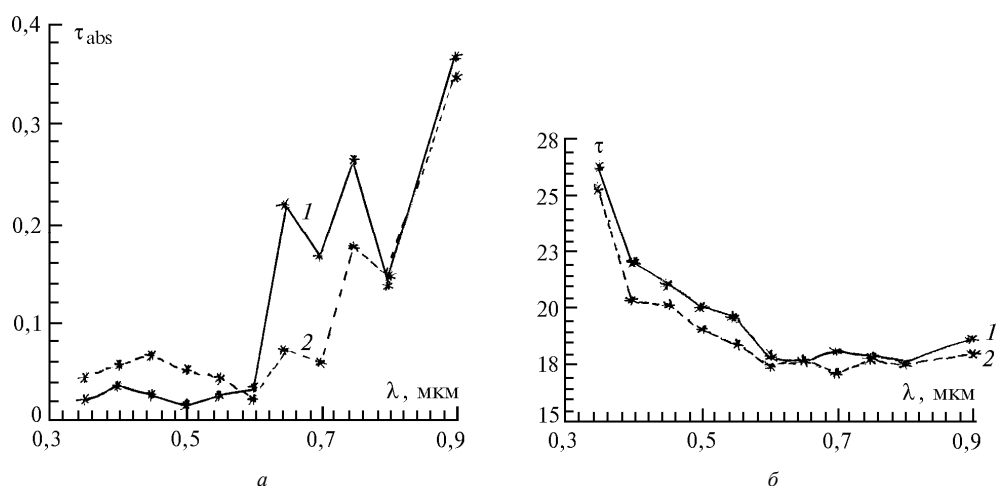
Определение величины среднего косинуса индикатрисы рассеяния. При соблюдении оптимальных условий наблюдений (стабильность, однородность и большая оптическая толщина облачного слоя, невысокое альbedo подстилающей поверхности и высокая точность измерений), обеспечивающих минимально возможные погрешности, можно применить следующий метод для оценки величины среднего косинуса индикатрисы рассеяния g . Рассмотрим две пары измерений прошедшей сквозь облачный слой радиации, выполненные по описанной выше схеме. По первой паре определяется параметр s^2 . Вторая пара позволяет определить величину $U = [u_2(\zeta_1)/u_0(\zeta_1)] - [u_2(\zeta_2)/u_0(\zeta_2)]$. Численный анализ табличных значений функций $u_0(\zeta)$ и $u(\zeta)$, приведенных в работе [4], показал, что функцию U с точностью до 2% оказалось возможным аппроксимировать линейной зависимостью от параметра g и от разности $\zeta_1 - \zeta_2$: $U = 5,57 (\zeta_1 - \zeta_2)g$ и получить оценку параметра индикатрисы g , который ранее обычно задавали *a priori* на основании предположений о размерах капель в облаке и расчетах по теории Ми.

Результаты измерений и их интерпретация. Наземные измерения интенсивности солнечной радиации были произведены на арктической дрейфующей станции СП-22 летом и осенью 1979 г. в случае сплошной слоистой облачности (13.08.79 и 08.10.79) и в безоблачных условиях (16.06.79) [6]. Последние дали возможность осуществить калибровку прибора по Солнцу, что позволило определить оптическую толщину облачного слоя. Угловое разрешение прибора $\sim 2^\circ$. Относительная погрешность измерений интенсивности рассеянной солнечной радиации не превышала 5%. Имеются результаты для 11 длин волн.

Оптические параметры облачного слоя, определенные на основе наземных измерений интенсивности солнечной радиации

λ , мкм	13.08.79			08.10.79		
	ω_0	τ	g	ω_0	τ	g
0,35	0,9989	25,5	0,88	1,0	26,2	0,83
0,40	0,9981	22,2	0,85	1,0	20,6	0,85
0,45	0,9987	21,0	0,85	0,9963	20,0	0,82
0,50	0,9994	20,2	0,83	0,9985	19,3	0,82
0,55	0,9990	19,7	0,85	0,9974	18,5	0,80
0,60	0,9985	17,6	0,82	0,9987	17,4	0,79
0,65	0,9907	17,3	0,82	0,9957	17,7	0,81
0,70	0,9930	17,8	0,83	0,9968	17,0	0,77
0,75	0,9894	16,5	0,80	0,9921	17,6	0,80
0,80	0,9919	17,1	–	0,9919	17,4	0,78
0,90	0,9844	14,9	0,81	0,9868	18,0	0,75

Пары значений интенсивности для каждой длины волны и для пары углов η обрабатывались согласно предложенной выше методике. Измерения проводились для 5 направлений визирования, что дало возможность составить несколько пар углов. Для каждой пары определялись искомые параметры и затем вычислялись средние значения s^2 и τ и оценивался параметр g . Значения оптической толщины τ и альbedo однократного рассеяния ω_0 вычислялись с учетом уточненных значений величины g . Результаты представлены в таблице и на рисунке. Истинное поглощение в слое характеризуется величиной оптической толщины поглощения $\tau_{\text{abs}} \sim 0,02 - 0,06$ что согласуется со значениями, полученными ранее при интерпретации самолетных измерений [2]. Значения ω_0 указывают на сильное поглощение в облачном слое в видимой области спектра и свидетельствует о наличии «аномального» поглощения. Суммарная оптическая толщина τ имеет величину, характерную для слоистых облаков (~ 20) и показывает ярко выраженный спектральный ход, аналогичный полученному ранее из анализа самолетных радиационных экспериментов [2].



Спектральные зависимости оптической толщины истинного поглощения (а) и оптической толщины рассеяния (б), полученные из данных наземных радиационных измерений на дрейфующей станции СП-22: 1–13 августа 1979 г. и 2–8 октября 1979 г.

Заключение. Предложенный метод определения оптических параметров слоистой облачности по измерениям солнечной радиации основан на строгих аналитических формулах теории переноса и удобен для применения в радиационном наземном или спутниковом мониторинге облачной атмосферы.

Анализ погрешностей метода показывает, что при привлечении измерений с точностью, реализуемой в современных приборах, параметры облака, характеризующие истинное поглощение и рассеяние света, восстанавливаются с ошибкой не более 6–15%.

Использование потоков излучения обеспечивает более высокую точность по сравнению с интенсивностями, но требует стабильности метеорологической ситуации.

Впервые предложена возможность оценить параметр вытянутости индикатрисы рассеяния из измерений рассеянной солнечной радиации.

Результаты, полученные при интерпретации радиационных измерений в Арктике, подтверждают наличие весьма значительного истинного поглощения света в облаке и сильной спектральной зависимости оптической толщины, обнаруженных ранее в других облачных слоях иным методом из самолетных радиационных измерений [2].

1. Cess R.D., Zhang M.H., Minnis P., Corsetti L., Dutton G., Forgan B.W., Garber D.B., Gates W.L., Morcrette J.J., Potter G.L., Ramanathan V., Subasilar B., Whitlock C.H., Yound D.F., and Zhou Y. // *Science*. 1995. V. 267. P. 496–499.
2. Mel'nikova I.N., Mikhailov V.V. // *J. Atmos. Sci.* 1994. V. 51. N 4. P. 925–931.
3. Минин И.Н. Теория переноса излучения в атмосферах планет. М.: Наука, 1988. 264 с.
4. Dlugach J.M., Yanovitskij E.G. // *Icarus*. 1974. V. 22. P. 66–81.
5. Мельникова И.Н. // *Оптика атмосферы и океана*. 1993. Т. 5. N 2. С. 169–177.
6. Радионов В.Ф., Сакунов Г.Г., Гришечкин В.С. // *Первый глобальный эксперимент ПИГАП. Т. 2. Полярный аэрозоль, протяженная облачность и радиация*. Л.: Гидрометеиздат, 1981. С. 89–91.

НИИФ при Санкт-Петербургском государственном университете

Поступила в редакцию 5 июля 1996 г.

I. N. Mel'nikova, P. I. Domnin. **Determination of Cloud Layer Optical Parameters from Measurements of Reflected and Transmitted Solar Radiation.**

The strict analytical formulas are derived from asymptotic formulas of the radiative transfer theory for determination of optical thickness and single scattering albedo on base of measurements of reflected or transmitted solar radiance or irradiance in strati clouds. The detailed error analysis of the methodology proposed is carried out. The formulas deduced are applicable for interpretation of the spectral data of ground-based measurements obtained at the drifting Arctic station in 1979. The values of optical thickness and single scattering albedo obtained reveal the apparent spectral dependency.