

Ирина Н. Мельникова¹, Игнасио Галиндо², Рамон Солано²

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЛОИСТОЙ ОБЛАЧНОСТИ ИЗ ИЗМЕРЕНИЙ AVHRR

¹Центр исследований климатической системы, Университет Токио, Япония²Университетский Центр научных исследований окружающей среды, Колимский университет, Мексика

Поступила в редакцию 24.12.98 г.

Принята к печати 3.02.99 г.

Из AVHRR измерений интенсивности с помощью асимптотических методов получены альbedo однократного рассеяния и оптическая толщина слоистых облаков.

Введение

Слоистая облачность имеет огромное влияние на баланс энергии в атмосфере и играет важную роль при моделировании погодных и климатических изменений вследствие ее большой протяженности и высокой временной стабильности, что объясняет интерес к изучению оптических свойств реальной слоистой облачности. Для этих целей могут использоваться радиационные измерения со спутников [1–3]. Однако в исследованиях последних лет основное внимание уделяется восстановлению оптической толщины в предположении консервативного рассеяния в облачном слое в видимом диапазоне. Самолетные измерения в облачности показали, что это редко соответствует условиям реальной атмосферы [4]. Ошибка в восстановлении оптической толщины без учета истинного поглощения может составить 20% [5].

Ниже представлен аналитический метод интерпретации дистанционных измерений интенсивности и потоков отраженной радиации [5,6] из данных AVHRR. Реализация метода основана на асимптотических формулах теории переноса излучения, представляющих собой строгое решение уравнения переноса излучения для диффузной среды высокой оптической толщины (соответствующей случаю слоистообразной облачности). Рассмотрена модель бесконечного и однородного слоя большой оптической толщины в горизонтальном направлении.

Данные наблюдений

Данные, используемые в этой статье, получены на наземной принимающей станции спутниковой информации, расположенной на территории университета г. Колима в Мексике. Спутниковые изображения в каналах 1 (0,58–0,68 мкм) и 2 (0,725–1,10 мкм) радиометра AVHRR калибровались с помощью коэффициентов, предоставленных NOAA. Перевод значений альbedo, выраженных в процентах, в спектральную интенсивность в абсолютных единицах производился с помощью процедур, описанных в [7, 8].

Обработанные данные соответствуют двум последовательным проходам спутников 2 июля 1996 г. (день номер 184): спутника NOAA-12 в 13 ч 38 мин по Гринвичу

(7 ч 38 мин местного времени) и спутника NOAA-14 в 21 ч 03 мин по Гринвичу (15 ч 03 мин местного времени). Оба изображения соответствуют одной и той же географической зоне с координатами 16° с.ш. и 103° з.д. (юго-западнее Мехико), а их пространственное разрешение (размер пикселя) составляет 1,1 км (рис. 1).

Чтобы получить зрительное представление о географическом положении, получено GIF-изображение, на котором с интервалом 5' нанесены географические линии. Географическая привязка каждого пикселя изображения может быть осуществлена с помощью сети 14×14 контрольных точек на местности, т.е. в сумме по 196 точкам с известными координатами. Эти точки пронумерованы от 1 до 196 и упорядочены слева направо и сверху вниз на изображении. На GIF-изображении они обозначены красным значком «+». Кроме того, для каждой наземной контрольной точки приведены зенитный угол Солнца, зенитный угол спутника, угол Солнце–пиксель–спутник и отраженный угол Солнце–пиксель–спутник. Каждая точка на изображении имеет единицу измерения интенсивности Вт/(м²·мк·ср) [7]. Перевод осуществлен с помощью соответствующих калибровочных коэффициентов для каждого спутника. Численные результаты в форме интенсивности калиброванных изображений преобразованы в ASCII файл с той же размерностью (ряды, колонки), что и изображение. Для нахождения выраженной в процентах функции отражения, соответствующей этим значениям интенсивности, необходимо произвести обращение согласно формуле

$$\rho(\mu_0, \mu) = I(\mu_0, \mu) 100 \pi W / (F \mu_0), \quad (1)$$

где $\rho(\mu_0, \mu)$ – функция отражения; $I(\mu_0, \mu)$ – значение интенсивности, Вт/(м²·мк·ср); W – эквивалентная ширина характеристической спектральной функции, мк, каналов AVHRR; F – интегральный поток солнечной радиации, взятый с весом спектральной характеристической функции канала, Вт/м².

В табл. 1 приведены значения W и F , предоставленные NOAA [7].

Данные на рисунке, обозначенные 1841338 (рис. 1, а), соответствуют полярному спутнику NOAA-12, а маркировка 1842103 (рис. 1, б) – спутнику NOAA-14.

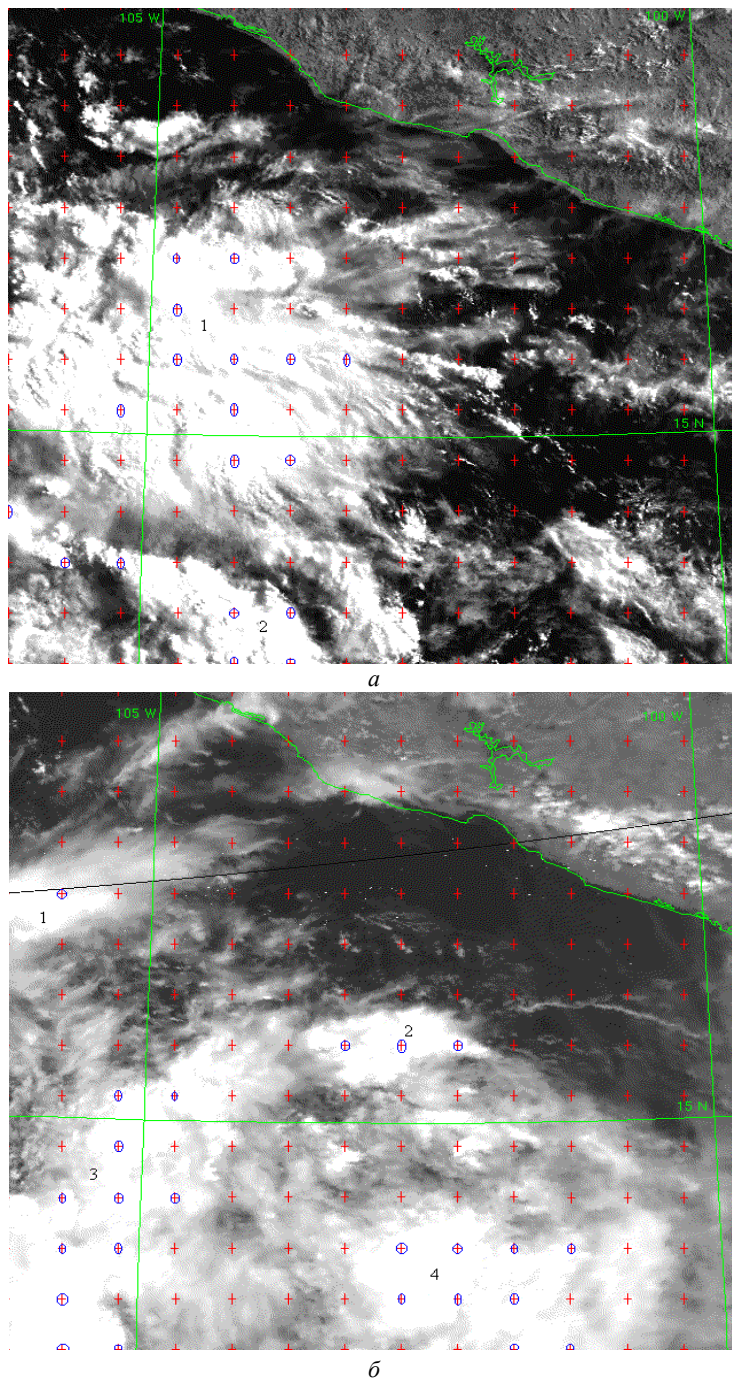


Рис. 1. Изображение для первого прохождения спутника: 1996, день номер 184 (июль 2); *a* – спутник NOAA-12 13 ч 38 мин по Гринвичу (7 ч 38 мин местного времени); *б* – спутник NOAA-14 в 21 ч 03 мин по Гринвичу (15 ч 03 мин местного времени)

Т а б л и ц а 1

Значения *W* и *F* для каналов 1-го и 2-го радиометров AVHRR

Спутник	<i>W</i> 1	<i>F</i> 1	<i>W</i> 2	<i>F</i> 2
NOAA-12	0,124	200,1	0,219	229,9
NOAA-14	0,136	221,42	0,245	252,29

Теория

Как известно, интенсивность отраженной радиации в единицах падающего на верхнюю границу облачного слоя

потока солнечной радиации для оптически плотного, слабо поглощающего слоя может быть выражена в виде

$$\rho_{\infty}(\tau, \mu, \mu_0) = \rho_{\infty}(\mu, \mu_0) - \frac{m \bar{l} K(\mu) K(\mu_0) \exp(-2k\tau)}{1 - \bar{l} \exp(-2k\tau)}, \quad (2)$$

где $\rho_{\infty}(\tau, \mu_0, \mu)$ – коэффициент отражения для полубесконечной атмосферы; функция $K(\mu)$ описывает угловую зависимость интенсивности, а m, l, k – константы, определяемые рассеивающими свойствами слоя. Если истинное

поглощение мало по сравнению с рассеянием ($1 - \omega_0 \ll 1$, что соответствует случаю переноса излучения видимого диапазона в облачности), то эти значения описываются известными разложениями по степеням малого параметра $1 - \omega_0$ [9–12]. Здесь эти разложения выражены через параметр s , где $s^2 = (1 - \omega_0)/[3(1 - g)]$, и учитываются члены порядка не выше 2:

$$k^2 = 3(1 - g) s; \quad m = 8 s; \quad l = 1 - 6q' s + 18 q'^2 s^2;$$

$$K(\mu) = K_0(\mu) (1 - 3q' s) + K_2(\mu) s^2; \quad (3)$$

$$\rho_\infty(\mu_0, \mu) = \rho_0(\mu_0, \mu) - 4K_0(\mu) K_0(\mu_0) s + \frac{a_2(\mu) a_2(\mu_0)}{12q'} s^2,$$

где $q' = 0,714$; $K_0(\mu)$, $\rho_0(\mu_0, \mu)$ – значения функций $K(\mu)$ и $\rho_\infty(\mu_0, \mu)$ при полном отсутствии поглощения (консервативное рассеяние с $\omega_0 = 1$). Для $K_0(\mu)$ и $\rho_0(\mu_0, \mu)$ имеются аналитические и табличные представления [9–12], так же как и для $K_2(\mu)$ [11]. Например, используя точные расчеты [13], $K_0(\mu)$ может быть аппроксимирована формулой вида $K_0(\mu) = 0,797 \mu + 0,442$ [13].

Математический вывод аналитических формул (3) достаточно строг, и их точность определяется членами $\sim s^3$, не учитываемыми в данных разложениях. Следующая группа формул представлена приближениями [5, 6, 14], полученными на основе анализа табличных значений функций $K(\mu)$, $a(\mu)$ и $\rho_\infty(\mu_0, \mu)$ [9, 13]:

$$K_2(\mu) = 5/3 n_2 (\mu^2 + 0,1);$$

$$n_2 = 9 q'^2 - 3(1 - g) + 2/(1 + g);$$

$$a_2(\mu) = 3K_0(\mu)[3((1,271\mu - 0,9) + 4q')/(1 + g)]; \quad (4)$$

$$\rho_0(\mu, \mu_0) = (\mu + \mu_0)^{-1} [f_0(\mu)f_0(\mu_0) + g(1,19\mu\mu_0 - 0,74(\mu + \mu_0) + 0,49)],$$

где

$$f_0(\mu) = 0,937 \mu + 0,529 \quad (\mu \geq 0,15). \quad (5)$$

Предположим, что в двух точках с углами наблюдения μ_1 , μ_2 и Солнца μ_{01} , μ_{02} измеряются два значения интенсивности отраженной радиации ρ_1 , ρ_2 . Записав уравнение (2) для двух пар углов μ_1, μ_2 и μ_{01}, μ_{02} , взяв отношение $(\rho_\infty(\mu_1, \mu_0) - \rho_1)/(\rho_\infty(\mu_2, \mu_0) - \rho_2)$ и используя разложения (3) и выражения (4), (5), для s имеем

$$s^2 = \frac{[\rho_0(\mu_1, \mu_{01}) - \rho_1] K_0(\mu_2) K_0(\mu_{02})}{Dn} - \frac{[\rho_0(\mu_2, \mu_{02}) - \rho_2] K_0(\mu_1) K_0(\mu_{01})}{Dn};$$

$$Dn = K_0(\mu_1) K_0(\mu_{01}) [\rho_0(\mu_2, \mu_{02}) - \rho_2] \times$$

$$\times \left[\frac{K_2(\mu_{01})}{K_0(\mu_{01})} - \frac{K_2(\mu_{02})}{K_0(\mu_{02})} + 9q'^2 \right] - K_0(\mu_2) K_0(\mu_{02}) [\rho_0(\mu_1, \mu_{01}) - \rho_1] \times$$

$$\times \left[\frac{K_2(\mu_2)}{K_0(\mu_2)} - \frac{K_2(\mu_1)}{K_0(\mu_1)} + 9q'^2 \right] + \frac{[K_0(\mu_1) K_0(\mu_{01}) a_2(\mu_2) a_2(\mu_{02}) - K_0(\mu_2) K_0(\mu_{02}) a_2(\mu_1) a_2(\mu_{01})]}{12 q'}.$$

$$(6)$$

Для оптической толщины $\tau' = 3 \tau(1 - g)$ используем формулу из [14] и получаем

$$\tau' = (2s)^{-1} \ln \left\{ \frac{m \bar{K}(\mu_1) K(\mu_0)}{\rho_1(\mu_1, \mu_0) - \rho_1} + l \bar{l} \right\}. \quad (7)$$

Эти формулы содержат только измеряемые значения величин ρ_1 , ρ_2 и функций для фиксированных углов $\mu_{01,2}$, $\mu_{1,2}$, которые можно найти либо из таблиц, либо из представленных выше аппроксимаций (4) и (5). Значение коэффициента асимметрии (параметра g в индикатрисе Хенли–Гринштейна) берется равным 0,85. Подробный анализ ошибок выполнен в [5, 6]. Точность метода снижается при малых оптических толщинах и значительном поглощении. Таким образом, его целесообразно использовать в видимом диапазоне в случае оптически плотной облачности.

Параметризация горизонтальной неоднородности облаков

В работе [10] предложена простая приближенная параметризация неоднородности верхней границы облачности. Геометрические вариации на верхней границе облачного слоя увеличивают диффузную составляющую падающего на верхнюю границу потока; следовательно, их необходимо учитывать при расчете радиационных характеристик, зависящих от условий освещения. Для интенсивностей отраженной радиации данная зависимость описывается функцией выхода и коэффициентом отражения, а для потоков – плоским альбедо полубесконечной среды. Поэтому предлагается заменить функции, зависящие от угла падения μ_0 , на следующие величины:

$$\rho^*(\mu, \mu_0) = \rho^0(\mu, \mu_0) (1 - r) + r a(\mu);$$

$$K(\mu_0) = K(\mu_0) (1 - r) + r n;$$

$$a(\mu_0) = a(\mu_0) (1 - r) + r a^\infty, \quad (8)$$

где сферическое альбедо a^∞ , плоское альбедо $a(\mu_0)$ и параметр n определяются формулами:

$$a^\infty = 2 \int_0^1 a(\mu_0) \mu_0 d\mu_0 = 4 \int_0^1 \mu_0 d\mu_0 \int_0^1 \rho^0(\mu, \mu_0) \mu d\mu;$$

$$n = 2 \int_0^1 K(\mu_0) \mu_0 d\mu_0, \quad (9)$$

а параметр r описывает полностью диффузную компоненту падающего на верхнюю границу потока, возникшую из-за неровности верхней границы облачного слоя. Аналогичным образом можно учесть диффузную составляющую падающего потока, рассеянную надоблачным слоем атмосферы.

Полезно сравнить наши выводы с более строгими результатами, полученными недавно и касающимися влияния облачной неоднородности на характеристики отраженной радиации. В последние годы этому вопросу было посвящено много работ [15–18]. В [15] показано, что геометрические вариации доминируют над внутриоблачными вариациями плотности. Аналитически данная задача решена в работах [15, 16], в которых показано, что влияние об-

лачной неоднородности на потоки можно учесть путем замены функции выхода выражениями, аналогичными формуле (8). Существуют различные оценки степени подобного влияния. В данном случае оно выражается параметром r . Обзор указанных выше работ позволяет использовать значение $r = 0,01$. Многочисленные результаты показывают, что возмущение радиационного поля минимально для зенитных углов Солнца, для которых $\cos \mu_0 \sim 0,6-0,7$. Ранее в работе [13] показано, что все функции, зависящие от угла падения, приблизительно равны соответствующим интегралам по угловой переменной. По этой причине влияние неоднородности незначительно, если для измерений выбрана область подходящих углов падения или визирования.

Результат восстановления

В данной статье рассмотрен предварительный этап обработки спутниковых данных, поэтому она не содержит подробной информации для каждого пикселя. При обработке использовались лишь значения в отдельных точках, обозначенных кружками на рисунке. На каждом рисунке различимо несколько облачных полей. На рис. 1 они пронумерованы.

Нашей целью не является детальный анализ влияния горизонтальной неоднородности облаков на точность ме-

тода. Этот вопрос требует дальнейшего исследования. Как видно из рис. 1, и особенно из рис. 1, а, облака достаточно неоднородны по горизонтали. Кроме того, большой зенитный угол Солнца в данном случае усиливает влияние неоднородности. Поэтому на первой стадии определялись значения оптической толщины для каждого пикселя в приближении независимых пикселей и консервативного рассеяния. Затем для пикселей с одинаковой оптической толщиной в том же облачном поле восстанавливалось альbedo однократного рассеяния с помощью формулы (6). Это удалось сделать не для всех пар пикселей. Для некоторых пар пикселей в процессе обработки получались отрицательные значения величины s , но для других пар тех же пикселей был получен приемлемый результат.

Для каждого облачного поля предполагалась горизонтальная неоднородность лишь оптической толщины, а коэффициент поглощения считался постоянным. Далее с помощью уравнения (7) для каждого пикселя рассчитывалась оптическая толщина при известном альbedo однократного рассеяния для рассматриваемого облачного поля. Полученные результаты представлены в табл. 2 для первого и второго проходов спутника. Значения альbedo однократного рассеяния указаны только для пикселей, где восстановление прошло успешно.

Таблица 2

Радиационные и геометрические данные и оптические параметры, восстановленные для обрабатываемых точек

Номер прохождения / Номер облачного поля	Номер точки	μ_0	μ	$I,$ $\text{Вт}^2 \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$	$1 - \omega_0$	τ
1/1	74	0,2648	0,8335	182,77		6,0
1/1	75	0,2771	0,8840	167,08	0,0131	5,9
1/1	88	0,2596	0,8372	171,56	0,0131	5,5
1/1	102	0,2542	0,8409	154,54		4,8
1/1	103	0,2663	0,8904	242,15		14,5
1/1	104	0,2782	0,9339	219,18	0,0276	10,2
1/1	105	0,2899	0,9681	291,45	0,0285	25,5
1/1	115	0,2368	0,7928	286,97		35,6
1/1	117	0,2609	0,8936	259,52	0,0285	22,9
1/1	131	0,2555	0,8967	233,19		15,2
1/1	132	0,2673	0,9388	211,34	0,0276	11,4
1/2	156	0,2091	0,7547	283,77		80,3
1/2	157	0,2207	0,8048	286,97		81,0
1/2	173	0,2389	0,9060	219,74	0,0183	17,4
1/2	174	0,2505	0,9461	227,59	0,0183	17,9
1/2	187	0,2331	0,9092	183,89		9,9
1/2	188	0,2447	0,9485	193,41		10,9
2/1	57	0,8798	0,9548	161,24	0,061	3,2
2/1	58	0,8742	0,9184	144,8	0,061	2,9
2/2	105	0,8525	0,6778	174,81	0,180	1,6
2/2	106	0,8458	0,6312	169,1	0,101	1,2
2/2	107	0,8391	0,5877	161,24	0,101	1,0
2/3	115	0,8794	0,8634	153,73	0,036	2,6
2/3	116	0,8736	0,8172	164,09	0,024	2,4
2/3	129	0,8817	0,8602	166,6	0,050	2,7
2/3	141	0,8952	0,9392	127,65	0,023	2,8
2/3	142	0,8896	0,9005	148,37	0,042	2,8
2/3	143	0,8839	0,8571	158,73	0,047	2,6
2/3	144	0,8780	0,8108	152,3	0,061	2,3
2/3	155	0,8971	0,9365	146,23	0,045	3,0
2/3	156	0,8915	0,8975	150,52	0,048	2,8
2/3	157	0,8859	0,8539	150,16	0,020	2,6
2/3	169	0,8989	0,9337	157,66	0,041	3,1
2/3	170	0,8934	0,8945	179,81	0,017	3,1
2/3	183	0,9006	0,9309	166,6	0,017	3,1
2/3	184	0,8951	0,8914	195,53	0,053	3,2
2/3	185	0,8894	0,8476	168,74	0,012	2,7
2/4	162	0,8546	0,6198	153,73	0,22	1,2
2/4	163	0,8478	0,5765	161,24	0,34	1,0

Номер прохождения / Номер облачного поля	Номер точки	μ_0	μ	$I,$ $\text{Вт}^2 \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$	$1 - \omega_0$	τ
2/4	164	0,8407	0,5354	143,37	0,13	0,5
2/4	165	0,8335	0,4966	151,23	0,24	0,3
2/4	176	0,8564	0,6171	168,02	0,35	1,3
2/4	177	0,8495	0,5739	154,09	0,30	0,9
2/4	178	0,8424	0,5329	150,87	0,32	0,6
2/4	192	0,8441	0,5304	141,23	0,13	0,5
2/4	193	0,8368	0,4917	149,09	0,52	0,3

В ряде случаев формула (3) оказалась непригодной для определения оптической толщины, поэтому была использована формула для чистого рассеяния, в частности для второго прохождения спутника, где наблюдалась более тонкая облачность. Это значительно отразилось на точности результатов.

Полученные значения величины $1 - \omega_0$ и оптической толщины представлены в табл. 2. Из таблицы видно, что оптическая толщина больше на первом изображении, особенно для облачного поля 1. При втором прохождении спутника значения оптической толщины достаточно малы, в результате альbedo однократного рассеяния восстановлено неточно.

Для обоих изображений значения альbedo однократного рассеяния малы, поэтому поглощение в исследуемой облачности весьма велико. Полученные результаты являются предварительными, и для их уточнения необходимо подвергнуть данной обработке оставшиеся облачные пиксели на изображениях. Результаты на рис. 1, б (второе прохождение спутника) выглядят более однородно, это же видно из табл. 2.

Предлагаемый метод нуждается в проверке и учете всех факторов, влияющих на его точность. Прежде всего необходимо оценить влияние облачной неоднородности и подобрать пары пикселей в данном облачном поле, позволяющие осуществить процедуру восстановления. Тем не менее простота метода делает его весьма перспективным для восстановления оптических характеристик слоистой облачности.

1. Nakajima T.Y., Nakajima T. // J. Atmos. Sci. 1995. V. 52. P. 4043–4059.

2. Nakajima T., King M.D. // J. Atm. Sci. 1990. V. 47. P. 1878–1893.
3. Рублев А.Н., Троценко А.Н., Романов П.Ю. Использование данных спутникового радиометра AVHRR для определения оптической толщины облачности // Изв. РАН. Сер. ФАО. 1997. V. 33. № 5. P. 670–675.
4. Kondratyev K.Ya., Binenko V.I., Melnikova I.N. // Meteorology and Atmospheric Physics. 1997. V. 65. P. 1–10.
5. Melnikova I.N., Domnin P.I., Mikhailov V.V., Radionov V.F. // J. Atmos. Sci. (in print).
6. Melnikova I.N., Domnin P.I. // Atmos. and Ocean Optics. 1997. V. 10. N. 7. P. 734–740.
7. Kidwell H.B. (Comp. and Ed.) NOAA Polar Orbiter Data Users Guide. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite. Data and Information Service. Washington, D.C. 1995.
8. Lauritsson L., Nelson G. J., Porto F.W. Data Extraction and Calibration of TIROS-N/NOAA Radiometers. NOAA Technical Memorandum NESS 107. Washington. D.C.
9. Van der Hulst H.C. Multiple Light Scattering. Tables, Formulas and Applications. V. 1 and 2. Academic Press, 1980. 739 p.
10. Sobolev V.V. Light scattering in planet atmospheres. Nauka, 1972. 336 p. (in Russian).
11. Minin I.N. Radiation transfer theory in planetary atmospheres. Nauka, 1988. 264 p. (in Russian).
12. Yanovitskij E.G. Light scattering in inhomogeneous atmospheres. Kiev, 1995. 400 p. (in Russian).
13. Melnikova I.N., Dlugach Zh.M., Nakajima T., Kawamoto K. // Appl. Opt. J. Opt. Soc. Amer. (in print).
14. King M.D. // J. Atmos. Sci. 1987. V. 44. N 13. P. 1734–1751.
15. Galinsky V.L., Ramanathan V. // J. Atmos. Sci. 1998. V. 55. P. 2946–2955.
16. Tarabukhina I.M. // Izv. RAS, Atmosphere and Ocean Physics. 1987. V. 23. N 2. P. 148–155.
17. Titov G.A. // J. Atmos. Sci. 1998. V. 55. P. 1549–1560.
18. Marshak A., Davis A., Wiscomb W., Cahalan R. // J. Geoph. Res. 1998. V. 103. N D16. P. 19557–19567.

Irina N. Melnikova, Ignacio Galindo, Ramon Solano. Determination of Stratus clouds Optical Parameters from AVHRR Measurements.

Single scattering albedo and optical thickness of stratus clouds are obtained using asymptotic methods from AVHRR radiance measurements.