

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ ИЗ ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

И.Н. Мельникова

*Научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской Академии Наук,
Санкт-Петербург, Корпусная ул., д. 18, 197110
E-mail: Irina.Melnikova@pobox.spbu.ru*

Аналитический метод интерпретации данных измерений отраженной солнечной радиации основан на строгой теории многократного рассеяния радиации в случае облачных пикселей. Предпочтительнее результаты измерений в узких спектральных интервалах, но возможно применение метода и в случае широкополосных приборов или даже в интегральном спектре. Определяются оптические параметры протяженных облачных слоев: оптическая толщина и альbedo однократного рассеяния. Формулы, содержащие только значения отраженной интенсивности для двух направлений визирования и известные функции, определяемые из геометрии измерений, были выведены для случаев одинаковых и разных зенитных углов Солнца.

Введение

Во многих работах (напр. [1,2]) ранее производились оценки оптической толщины или параметра поглощения из измеренных характеристик отраженной солнечной радиации в коротковолновой области спектра. При этом использовались предположения консервативного рассеяния или оптически бесконечно-толстого слоя. Применялись также методы, предполагающие независимость оптической толщины по спектру и после ее определения в коротковолновом диапазоне, полученное значение использовалось в ближней ИК области спектра для определения величины альbedo однократного рассеяния. Но в случае истинного поглощения в атмосфере в коротковолновой области, ограниченного по толщине слоя, или наличия спектральной зависимости оптической толщины проявляются значительные погрешности таких ограничивающих предположений. Одновременное восстановление двух важных параметров во всех спектральных каналах является важным усовершенствованием по сравнению с другими работами. Предлагаемый аналитический метод основывается на обращении известных асимптотических формул для оптически толстых облачных слоев и слабом истинном поглощении радиации по сравнению с рассеянием.

В случае рассмотрения многоугловых и спектральных измерений процесс обработки данных производится для всех длин волн и пикселей независимо. В случае интерпретации измерений только для одного направления визирования обрабатываются соседние пиксели, для которых различаются как углы визирования, так и углы Солнца.

Данные дистанционных измерений отраженной интенсивности прибором POLDER с борта спутника ADEOS, прибора AVHRR с борта спутников NOAA и прибора CPPB на борту спутника «Метеор-3» были использованы для восстановления оптической толщины, альbedo однократного рассеяния. Предлагаемый метод позволяет оперативно определять оптические характеристики облачной атмосферы.

1. Описание данных спутниковых наблюдений

Прибор «ПОЛДЕР» был установлен на борт ИСЗ «АДЕОС», который был запущен на орбиту 17 августа 1996 г. в космическом центре Танегашима на полуострове Кагошима. Информация передавалась с 26 ноября 1996 г. до 30 июня 1997 г. Спутник «АДЕОС» представляет собой модуль с одним крылом солнечных батарей, размеры модуля 4x4x5м, размер крыла 3x26м и вес спутника 3,5т. Стабилизация спутника произведена по трем осям на солнечно-синхронизированной орбите высотой около 800км, с наклоном около 98,6° и периодом обращения около 101мин. Измерения проводились приблизительно в 10:15-10:45 местного солнечного времени.

Прибор «ПОЛДЕР» состоит из трех основных частей: матрицы фотоприемников с зарядной связью (ФПЗС) в качестве приемника, вращающегося колеса, несущего поляризационные и спектральные фильтры и телецентрическое оптическое устройство с фокусным расстоянием 3,57мм и с максимальным полем зрения 114° [3]. Детальное описание прибора, обработки и окончательных результатов измерений можно найти в [3].

В течение полета спутника над участком поверхности, пиксель остается в поле зрения прибора, и прибор производит от 6 до 14 измерений в каждом спектральном канале. Последовательные наблюдения прибора дают измерения отраженной интенсивности в нескольких (от 6 до 14) направлениях для всех на-

блюдаемых точек в поле зрения спутника. Для интерпретации были использованы данные в трех спектральных каналах 443, 670 и 865нм. Наблюдения, выбранные для интерпретации, были выполнены 24 июня 1997 г. Рассмотрены семь географических регионов с протяженной облачностью:

- 1) Северная часть Атлантики и западная часть Скандинавии (широта 60,75-57,75°с.ш., долгота 24,80°з.д. – 20,57°в.д.);
- 2) Скандинавия, северная часть Балтийского моря и северо-западная часть России (широта 60,75-57,75°с.ш., долгота 8,76°з.д. – 45,25°в.д.);
- 3) Север России (широта 60,75-57,75°с.ш., долгота 27,75 – 68,64°в.д.);
- 4) Атлантический океан (широта 43,75 – 47,75°с.ш., долгота 24,80°з.д. – 3,24°в.д.);
- 5) Юго-западная часть Европы (широта 43,75 – 47,75°с.ш., долгота 1,65°в.д – 30,24°в.д.)
- 6) Юго-восточная Азия и Тихий океан (широта 6,75 – 13,75°с.ш., долгота 121,63 – 124,11°в.д.).
- 7) Восточная Сибирь, южная часть о. Сахалин и северная часть о. Хоккайдо (широта 45.25 – 51.75°с.ш., долгота 126.80 – 148.68°в.д.).

Только пиксели с количеством облаков больше 0,5 рассматривались, как облачные и подвергались дальнейшей обработке. Пиксели с закрытием облаками меньше 0,5 не обрабатывались.

В данной статье рассмотрены также данные, полученные на наземной станции в университете г. Колима в Мексике. Спутниковые изображения в спектральных каналах 1 (0,58 - 0,68 мкм) и 2 (0,725-1,10 мкм) радиометра AVHRR калибровались с помощью коэффициентов, предоставленных NOAA. Обработанные данные соответствуют двум последовательным прохождением спутников 2 июля 1996 г.: спутника NOAA-12 в 7 ч 38 мин местного времени и спутника NOAA-14 в 15 ч 03 мин. Оба изображения соответствуют одной и той же географической зоне с координатами 16°с.ш. и 103°з.д. (юго-западнее г. Мехико), а их пространственное разрешение (размер пикселя) составляет 1,1 км (рис. 1).

В настоящей статье представлен результат обработки изображения, над северной частью Атлантического океана сканером СРРБ 22 мая 1994 с борта спутника «Метеор-3». Координаты изображения: долгота 5° зап. д. – 66° вост. д. и широта 71° сев.ш. – 53° сев. ш. Сканер радиационного баланса (СРРБ) является широкополосным 4-х канальным прибором, измеряющим радиацию, отраженную системой Земля-атмосфера в коротковолновом спектральном диапазоне: 0,2-0,4мкм (солнечный канал) и 0,2-50мкм (интегральный канал). Параметры орбиты спутника следующие: высота 1200км, наклонение орбиты около 82,5°, период обращения 109,4мин. Проекция одномоментного поля зрения на поверхность Земли имеет размер 60км². Длительность одного цикла сканирования 6 сек. За это время регистрируется радиация, отраженная от 51 пикселя в направлении, перпендикулярном траектории движения спутника. Получаемые данные имеют погрешность 0,1Вт/м²срад.

2. Теоретическая основа метода

Пусть параллельный поток солнечной радиации освещает верхнюю границу протяженного, горизонтально однородного облачного слоя большой оптической толщины $\tau \gg 1$. под углом $\arccos \mu_0$. Интенсивность отраженной радиации наблюдается под углом визирования $\arccos \mu$ и азимутальным углом по отношению к направлению на Солнце φ . Оптические свойства слоя описываются тремя параметрами: оптической толщиной τ , альбедо однократного рассеяния ω_0 и параметром асимметрии индикатрисы рассеяния g . Отражение от подстилающей поверхности характеризуется альбедо A . Отраженная радиация (в единицах потока падающего на верхнюю границу слоя $\pi S \mu_0$) описывается коэффициентом отражения $\rho(\varphi, \tau, \mu, \mu_0)$ [4]

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

где: $\rho_\infty(\varphi, \mu, \mu_0)$ – коэффициент отражения полубесконечной атмосферы; $K(\mu)$ – функция выхода. Эти функции описывают угловую зависимость отраженной слоем радиации; константы m, l, k зависят от поглощения радиации в слое и индикатрисы рассеяния. В случае слабого истинного поглощения по сравнению с рассеянием ($1 - \omega_0 \ll 1$, выполняется в облаках в коротковолновой области спектра) функции $\rho_\infty(\varphi, \mu, \mu_0)$ и $K(\mu)$ и константы m, l и k выражаются разложениями по степеням малого параметра $s^2 = (1 - \omega_0) / [3(1 - g)]$ [4,5]. Сохраняя члены, пропорциональные s и s^2 в разложениях по степеням s , было получено:

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

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

$$m = 8s \quad ,$$

$$l = 1 - 6q's + 18q'^2 s^2 \quad ,$$

$$k = 3(1-g)s \left[1 + s \left(1,5g - \frac{1.2}{1+g} \right) \right] \quad ,$$

где $\rho_0(\varphi, \mu, \mu_0) = \rho^0(\mu, \mu_0) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \rho^m(\mu, \mu_0) \cos m\varphi$, и $K_0(\mu)$ - значения функций $\rho_{\infty}(\varphi, \mu, \mu_0)$ и $K(\mu)$ для

консервативного рассеяния ($\omega_0=1$), функции $K_2(\mu)$ и $a_2(\mu)$ определены ниже и константа $q \approx 0,714$.

Аналитические и табличные представления функций $\rho^m(\mu, \mu_0)$ и $K_0(\mu)$ даны в [4-7]. Формулы (2) и (3) получены математически строго и ошибка их применения определяется членами, пропорциональными s^3 , которые отбрасываются в разложениях. В коротковолновом диапазоне параметр s меньше 0,2 и тогда ошибка формул (2) и (3) не превосходит 1%.

Следующая группа формул – аппроксимации, полученные в работах [5,6] для функций $\rho_0(\mu, \mu_0)$, $a_2(\mu)$, $K_0(\mu)$ и $K_2(\mu)$

$$\rho^0(\mu, \mu_0) = (\mu + \mu_0)^{-1} [f(\mu)f(\mu_0) + g(1,19\mu\mu_0 - 0,74(\mu + \mu_0) + 0,49)] \quad , \quad (3)$$

$$a_2(\mu) = 3K_0(\mu) \left(\frac{3}{1+g} (1,271\mu - 0,9) + 4q' \right) \quad , \quad (4)$$

$$K_0(\mu) = 0,797\mu + 0,442 \quad , \quad K_2(\mu) = 1,667n_2(\mu^2 + 0,1) \quad ,$$

$$n_2 = 9q'^2 - 3(1-g) + \frac{2}{1+g}g \quad , \quad \text{и} \quad f(\mu) = 0,937\mu + 0,529 \quad (\mu \geq 0,15).$$

Пусть измерена интенсивность отраженной радиации ρ_1 и ρ_2 в двух углах визирования $\arccos \mu_1$ and $\arccos \mu_2$. Из уравнения (1) легко получить выражение для параметра s^2 , рассматривая соответствующее отношение $(\rho_{\infty}(\mu_1, \mu_0) - \rho_1) / (\rho_{\infty}(\mu_2, \mu_0) - \rho_2)$. Формулы позволяющие определить параметр s^2 [7] и оптическую толщину [8] облачного слоя имеют следующий вид:

$$s^2 =$$

$$\frac{[\rho_0(\mu_1, \mu_0) - \rho_1]K_0(\mu_2) - [\rho_0(\mu_2, \mu_0) - \rho_2]K_0(\mu_1)}{[\rho_0(\mu_2, \mu_0) - \rho_2]K_0(\mu_1) \left(\frac{K_2(\mu_1)}{K_0(\mu_1)} - \frac{K_2(\mu_2)}{K_0(\mu_2)} \right) - 0,1167a_2(\mu)[K_0(\mu_1)a_2(\mu_2) - K_0(\mu_2)a_2(\mu_1)]} \quad , \quad (5)$$

$$\tau = \frac{1}{6s(1-g)} \ln \left\{ \frac{m\bar{l}K(\mu_1)K(\mu_0)}{\rho_{\infty}(\mu_1, \mu_0) - \rho_1} + \bar{l} \right\} \quad , \quad (6)$$

В формуле (5) содержатся только измеряемые величины ρ_1 и ρ_2 и известные функции угловых переменных μ_0 , μ_1 и μ_2 : $\rho_0(\mu, \mu_0)$, $a_2(\mu)$, $K_0(\mu)$ и $K_2(\mu)$. После определения параметра s^2 рассчитываются функции и константы по формулам (2), затем определяется оптическая толщина по формуле (6).

Если измерения ρ_1 , ρ_2 имеются для двух пикселей с разными зенитными углами Солнца $\arccos \mu_{01}$ и $\arccos \mu_{02}$ и с углами визирования $\arccos \mu_1$ и $\arccos \mu_2$. Формула для величины s^2 имеет более сложный вид:

$$s^2 = \frac{[\rho_0(\mu_1, \mu_{01}) - \rho_1]K_0(\mu_2)K_0(\mu_{02}) - [\rho_0(\mu_2, \mu_{02}) - \rho_2]K_0(\mu_1)K_0(\mu_{01})}{Dn + 0,1167[K_0(\mu_1)K_0(\mu_{01})a_2(\mu_2)a_2(\mu_{02}) - K_0(\mu_2)K_0(\mu_{02})a_2(\mu_1)a_2(\mu_{01})]} \quad (7)$$

$$Dn = K_0(\mu_1)K_0(\mu_{01})[\rho(\mu_2, \mu_{02}) - \rho_2] \left[\frac{K_2(\mu_{01})}{K_0(\mu_{01})} - \frac{K_2(\mu_{02})}{K_0(\mu_{02})} + 4,588 \right] -$$

$$- K_0(\mu_2)K_0(\mu_{02})[\rho(\mu_1, \mu_{01}) - \rho_1] \left[\frac{K_2(\mu_2)}{K_0(\mu_2)} - \frac{K_2(\mu_1)}{K_0(\mu_1)} + 4,588 \right]$$

Если оптическая толщина рассеивающего слоя очень велика ($\tau > 100$), то измеренная интенсивность отраженной радиации близка к значению коэффициента отражения полубесконечной среды $\rho_{\infty}(\varphi, \mu, \mu_0)$ и результат получится точнее, если использовать выражение параметра s , полученное из формулы для коэффициента отражения полубесконечного слоя $\rho_{\infty}(\varphi, \mu, \mu_0)$:

$$s = \frac{2K_0(\mu)K_0(\mu_0) + \sqrt{4K_0^2(\mu)K_0^2(\mu_0) + [\rho_{\infty}(\varphi, \mu, \mu_0) - \rho_0(\varphi, \mu, \mu_0)]0,1167a_2(\mu)a_2(\mu_0)}}{0,1167a_2(\mu)a_2(\mu_0)} \quad , \quad (8)$$

3. Параметризация горизонтальной неоднородности облачного слоя

Выступающие вверх облака приводят к увеличению доли диффузно-рассеянной радиации в падающем потоке на верхнюю границу облачности. Что существенно при расчете функций, зависящих от зенитного угла Солнца μ_0 , а именно для функции выхода $K(\mu_0)$, коэффициента отражения $\rho_\infty(\varphi, \mu, \mu_0)$ и плоского альbedo $a(\mu)$. Было предложено учесть горизонтальную неоднородность следующими выражениями [4]:

$$\begin{aligned} \rho(\mu, \mu_0) &= \rho(\mu, \mu_0)(1-r) + ra(\mu) \quad , \\ K(\mu_0) &= K(\mu_0)(1-r) + rn \quad , \\ a(\mu_0) &= a(\mu_0)(1-r) + ra^\infty \quad , \end{aligned} \quad (9)$$

где сферическое альbedo a^∞ , плоское альbedo $a(\mu_0)$ и величина n определяются как средне-взвешенные по величине μ величины соответствующих функций:

$$a^\infty = 2 \int_0^1 a(\mu_0) \mu_0 d\mu_0 = 4 \int_0^1 \mu_0 d\mu_0 \int_0^1 \rho(\mu, \mu_0) \mu d\mu \quad , \quad n = 2 \int_0^1 K(\mu_0) \mu_0 d\mu_0 \quad . \quad (10)$$

Параметр r введенный в соотношениях (9) учитывает влияние рассеяния радиации слоями атмосферы, расположенными над рассматриваемым облачным слоем (включая высокие перистые облака). Измерения прибора «ПОЛДЕР» выполнены для 14 направлений визирования, что дает возможность оценить параметр r . Для этого определяется оптическая толщина облачного слоя в предположении консервативного рассеяния по формуле [8]:

$$\tau = \left[\frac{4K_0(\mu_0)K_0(\mu)}{\rho_\infty - \rho} - \frac{4}{1-A} \right] \frac{1}{3(1-g)} - 2q' \quad . \quad (11)$$

Среднее отклонение от величины оптической толщины, полученной усреднением по всем направлениям визирования, может служить мерой отклонения верхней границы облачного слоя от плоскости. Тогда прием следующее выражение для вычисления параметра r :

$$r = \frac{1}{N\bar{\tau}} \sum_{i=1}^N |\tau_i - \bar{\tau}| \quad , \quad (12)$$

где N число направлений визирования для данного пикселя и $\bar{\tau}$ средняя по направлениям визирования оптическая толщина, в предположении консервативного рассеяния. Значения параметра r , как показано на рис. 2б приводит к независимым от длины волны значениям в пределах 0,01-0,12.

5. Алгоритм решения задачи

При обработке данных измерений прибором «ПОЛДЕР» была выработана следующая последовательность процедур для восстановления альbedo однократного рассеяния и оптической толщины облачных слоев:

1. Рассчитываются функции, зависящие от косинусов зенитных углов визирования и Солнца, азимутального угла и от индикатрисы рассеяния. Параметр асимметрии индикатрисы рассеяния g принят равным 0,854, 0,841 и 0,833, соответствующий длинам волн 443, 670 и 865нм [9].
2. Производится приближенный расчет оптической толщины в предположении консервативного рассеяния для каждого направления визирования. Полученные величины позволяют вычислить параметр затенения. и помогают отобрать для дальнейшего анализа пары направлений визирования с примерно равными оптические толщинами.
3. Определяется параметр s^2 из измеренных интенсивностей по формуле (5) для каждой пары направлений визирования. После усреднения полученных результатов по выбранным парам вычисляется относительное среднее квадратичное отклонение.
4. Определяется оптическая толщина слоя для данного пикселя с учетом истинного поглощения радиации по формуле (6) для каждого направления визирования с последующим усреднением и вычислением относительного среднего квадратичного отклонения.
5. Процедура повторяется для каждой длины волны и для каждого пикселя. Затем полученные результаты подготавливаются для картирования: производится вставка пропущенных пикселей, подстановка усредненных по окружающим пикселям значений на место пропущенного пикселя или пикселя, для которого есть измерения только для одного направления визирования значений, отбрасывание крайних в спутниковом изображении пикселей (так как ошибки измерений для таких пикселей увеличены) и пр. Окончательно результаты представляются на картах с использованием редактора GRADS, показанных на рисунке 3.

Подробный анализ ошибок метода и формулы для погрешностей приведены в работе [6]. Для каждого пикселя рассчитываются также погрешности с учетом ошибок измерений. В среднем погрешности в определяемых параметрах возрастают к краям спутникового изображения, так же как и ошибки измерений. Кроме того, средние квадратичные отклонения оказались больше в районах сильных изменений оптической толщины, характеризующихся столь сильной горизонтальной неоднородностью облачности, которую предложенная выше аппроксимация учесть не может.

Так как прибор AVHRR и сканер СРРБ измеряли интенсивность для одного направления визирования и поток отраженного солнечного излучения, то алгоритм для обработки данных изменяется и выглядит следующим образом:

- 1) Рассчитываются функции, зависящие от геометрии задачи и индикатрисы рассеяния.
- 2) Рассчитывается оптическая толщина в приближении консервативного рассеяния для группы соседних пикселей. Количество «соседей» для каждого пикселя и их удаленность от рассматриваемого пикселя определяется в процессе обработки. Процесс отбора производится таким образом, чтобы с одной стороны зенитные углы Солнца достаточно отличались, чтобы отличались соответствующие им функции выхода, а с другой стороны, чтобы не выйти за пределы одного поля облачности, свойства которого рассматриваются. Для данных, полученных со спутника «Метеор-3» рассматривались соседние пиксели на расстоянии не более 10 пикселей, для которых зенитный угол Солнца отличался не менее, чем на 6° а оптическая толщина отличалась на малое число. Кроме подбора пар пикселей на этом этапе оценивалась степень горизонтальной неоднородности облачного слоя.
- 3) Определяется параметр s^2 для всех пар, составленных из рассматриваемого пикселя и окружающих его соседей по формуле (7), значения усредняются, среднее приписывается рассматриваемому пикселю и рассчитывается среднее квадратичное отклонение. Далее определяется оптическая толщина с учетом поглощения по формуле (6).

Процедура повторяется для всех облачных пикселей. При обработке данных сканера СРРБ для полученных оптических параметров облачности рассчитывались также значения радиационных характеристик: отраженный и пропущенный потоки и поглощение радиации в слое. Полученные результаты представлялись для наглядности в виде карты.

6. Обсуждение результатов

На рис. 2 представлена пространственная зависимость величины единица минус альбеда однократного рассеяния (будем далее называть ко-альбеда $1-\omega_0$), оптической толщины τ_0 и параметра затенения r \times 100 для полосы пикселей на широте 48.75° с.ш. и интервала долготы от 129° в.д. до 157° в.д., и трех длин волн: 443нм – черная линия; 670нм – красная линия; 865нм – синяя линия. Напомним, что размер каждого пикселя около 60км. Для параметра затенения r зависимость от длины волны отсутствует. Спектральная зависимость оптической толщины – уменьшение оптической толщины с длиной волны – явно выражена для всех пикселей всех рассмотренных изображений (всего ~ 3500). При этом следует иметь в виду, что результат был получен для каждой длины волны независимо. В работах [5,10] предложено объяснение противоречия полученных результатов с модельными расчетами по теории рассеяния. Отсутствие полученного эффекта в модельных расчетах объясняется тем, что в облачной среде, состоящей из молекул воздуха, поглощающих аэрозолей и капель размеры частиц различаются на порядки и нарушены соотношения между характерными размерами в среде положенные в основу теории рассеяния света. Поэтому при расчетах оптических параметров в облачной среде нельзя напрямую пользоваться результатами теории рассеяния.

Изображения величин $1-\omega_0$ и τ_0 для всех пикселей представлены на рис. 3. Значения величины $1-\omega_0$ находятся в пределах 0,001-0,010. Наиболее характерные значения оптической толщины оказалось 10-25, но отдельные участки из нескольких пикселей имеют оптическую толщину 70-80 и в тропических районах даже около 100. Результаты восстановления оптических параметров из измерений AVHRR и СРРБ частично представлены в таблице 1 и на рисунке 4. Отметим, что погрешности при рассмотрении разных пикселей больше, но полученные значения полностью соответствуют величинам, полученным в других экспериментах (в том числе самолетных).

Номер облачного поля	Номер точки	μ_0	μ	I , $\text{Вт}^2\text{мкм}^{-1}\text{ср}^{-1}$	$1-\omega_0$	τ_0
1	74	0,2648	0,8335	182,77	-	6,0
1	75	0,2771	0,8840	167,08	0,0131	5,9
1	88	0,2596	0,8372	171,56	0,0131	5,5
1	102	0,2542	0,8409	154,54	-	4,8
1	103	0,2663	0,8904	242,15	-	14,5
1	104	0,2782	0,9339	219,18	0,0276	10,2

Заключение

Представлен метод для определения альбедо однократного рассеяния и оптической толщины облаков из измерений интенсивности или потока отраженной солнечной коротковолновой радиации. Метод дает значительное преимущество перед применяемыми ранее, потому что позволяет определить сразу два параметра: альбедо однократного рассеяния и оптическую толщину для каждой длины волны и для каждого пикселя. В результате применения метода к данным спутниковых измерений получены изображения оптических параметров протяженных облачных полей.

Приближенный учет влияния неровности верхней границы облачности оказался весьма эффективным как при решении прямой и обратной задач.

Представляется перспективным исследовать временные и пространственные закономерности вариаций оптических параметров облачности, анализируя результаты, полученные после глобальной обработки спутниковых данных предложенным методом.

Литература

1. *Nakajima, T.Y., T. Nakajima.* Wide-area determination of cloud microphysical properties from NOAA AVHRR Measurements for FIRE and ASTEX regions. *J. Atm. Sci.* 1995. P. 4043-4059.
2. *Розенберг Г.В., М.С.Малкевич, В.С.Малкова, В.И.Сячинов.* Определение оптических характеристик облаков из измерений отраженной солнечной радиации спутником Космос-320. *Изв.АН СССР. сер. Физика атмосферы и океана.* 1974. С.14-24.
3. *Deschamps, P.Y., F.M. Bréon, M. Leroy, A. Podaire, A. Bricaud, J.C. Buriez, and G. Sèze.* The POLDER Mission: Instrument Characteristics and Scientific Objectives. *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.* 1994. P. 598-615.
4. *Минин И.Н.* Теория переноса излучения в атмосферах планет. М.: Наука. 1988. 264 с.
5. *Мельникова И.Н.* Спектральные оптические параметры облачных слоев. Теория. Часть I. Оптика атмосферы и океана. 1992. № 2. С. 169-177.
6. *Melnikova, I. N., P.I. Domnin, V.V. Mikhailov, V.F. Radionov.* Optical characteristics of clouds derived from measurements of reflected or transmitted solar radiation. *J. Atmos. Sci.* 2000. V. 57. No. 6. P. 623-630,.
7. *Melnikova I.N., Dlugach Zh.M., Nakajima T., Kawamoto K.* On reflected function calculation simplification in case of cloud layers. *Applied Optics, J. Opt. Soc. Amer.* 2000. V. 39, P. 541-551
8. *King M.D.* Determination of the scaled optical thickness of clouds from reflected solar radiation measurements. *J. Atm. Sci.*, 1987. №.3. P. 1734-1751
9. *Stephens G. L.*, Optical properties of eight water cloud types. CSIRO. Aust. Div. Atmosph. Phys. Technical. Paper. Aspendale, Australia. 1979. № 36. P. 1-35.
10. *Мельникова И.Н., Михайлов В.В.* Ограничения на применение теории рассеяния в многокомпонентной мутной среде облачной атмосферы Оптика атмосферы и океана. (в печати).
11. *Melnikova I.N., Rudneva L. B.* Optical characteristics of clouds in Atlantic. IRS'2000. Current problems in Atmospheric Radiation. Proceedings of the International Radiation Symposium, July, 2000, St.Petersburg, Russia. P. 109-112.
12. *Мельникова И.Н., Галиндо И., Солано Р.* Определение оптических параметров слоистых облаков из измерений AVHRR. Оптика атмосферы и океана. 1999, т. 12, № 3. С. 283-287.

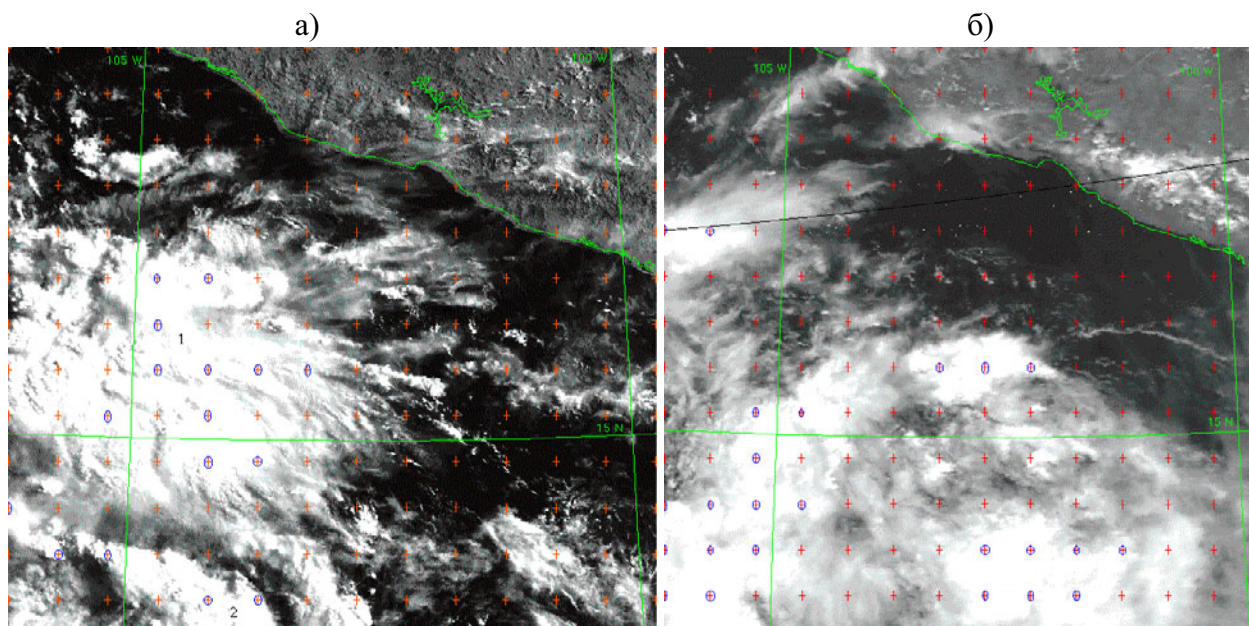


Рис. 1. Спутниковые изображения, полученные 2 июля 1996 г. над Мексикой а) NOAA-12 (7:38 час. местного времени) и б) NOAA-14 (15:03 час. местного времени). Цифры указывают номер облачного поля, синие кружки отмечают обработанные пиксели.

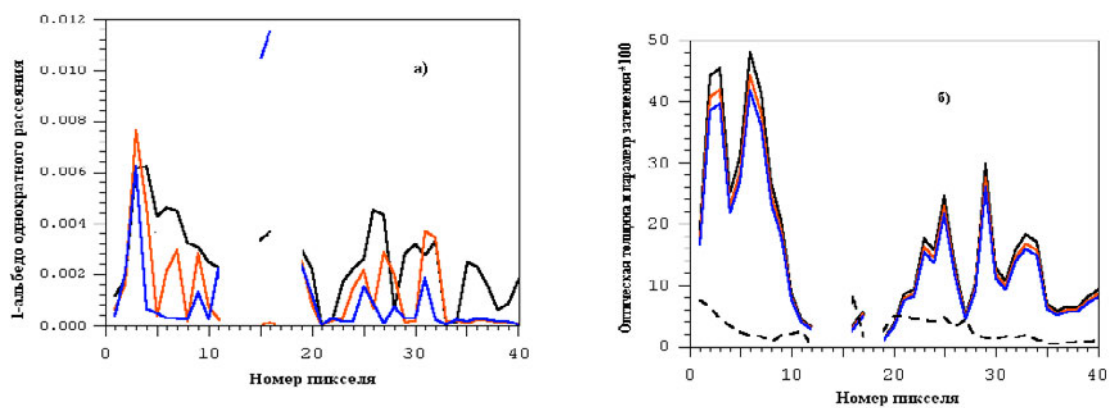


Рис. 2. Величина $1-\omega_0$ а) и оптическая толщина τ (сплошная линия) и параметр затенения $r \times 100$ (пунктирная линия) б) как функции номера пикселя для трех длин волн 443нм – черная линия; 670нм – красная линия; 865нм – синяя линия для широты 48.75° с.ш. и долготы от 129° в.д. до 157° в.д.;

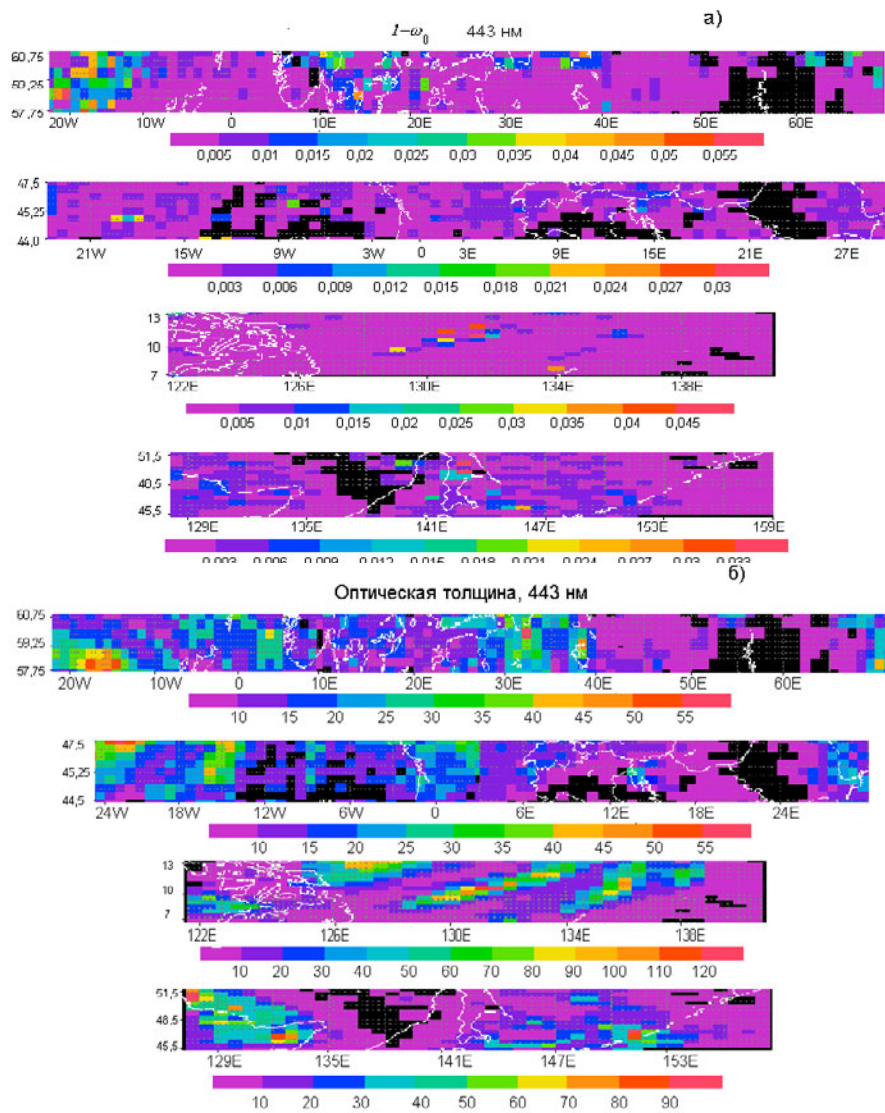


Рис. 3. Изображения величины $1-\omega_0$ а) и оптической толщины б), восстановленных из данных прибора ПОЛДЕР для длины волны 443 нм.

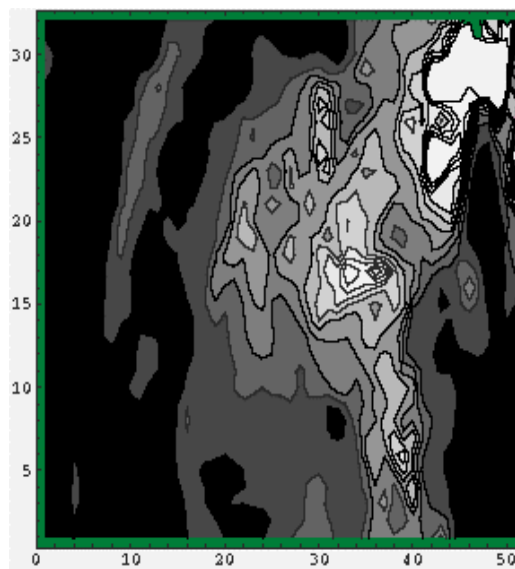


Рис. 4. Изображения оптической толщины протяженной облачности над северной Атлантикой, восстановленной из данных сканера СРРБ.