

М.Д. Геня, А.Д. Кузнецов, И.Н. Мельникова, Ч. Гатебе

**РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ САМОЛЕТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
ИНТЕНСИВНОСТИ РАССЕЯННОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ
В ОБЛАЧНОЙ АТМОСФЕРЕ**

M.J. Genya, A.D. Kuznetsov, I.N. Melnikova, Ch. Gatebe

**RESULTS OF PROCESSING AIRBORNE OBSERVATION OF
SCATTERED SOLAR RADIATION IN CLOUDY ATMOSPHERE**

В работе рассматриваются результаты решения обратной задачи на основе самолетных измерений США (НАСА) с учетом погрешностей измерений и восстановления параметров. В данной работе анализируется влияние погрешностей измерений, расчета угловых функций и решения обратной задачи на точность результатов и выполняется регуляризация решения.

Ключевые слова: солнечная радиация, интенсивность рассеянной радиации, погрешности измерений, обратная задача, регуляризация решения, оптические параметры облака.

Results of the inverse problem solution on the base of airborne radiative observation (NASA, USA and SPbSU, Russia) are considered. Here observational and processing uncertainties are taken into account for result regularization.

Key words: solar radiation, intensity, radiation field, inverse problem, cloud optical parameters, regularization of solution.

Введение

Получены результаты обработки данных измерений (оптическая толщина и альbedo однократного рассеяния), выполненных в самолетных экспериментах NASA, Goddard Space Flight Center в облачной атмосфере в соответствии с алгоритмом решения обратных задач оптики облаков, предложенным ранее [8, 14]. В статье описываются экспериментальные данные, использованные для решения обратной задачи, и кратко изложен аналитический метод решения обратной задачи оптики облаков. В статье приведены основные формулы для обработки экспериментальных данных, полученных из измерений над, под облачным слоем и внутри него [10, 21, 22], и полученные результаты. Представленный метод можно считать наиболее успешным и обеспечивающим результат адекватный реальной природе, так как он не требует априорных ограничений и наложения связей на искомые параметры, в отличие от методов, применявшихся другими авторами [1, 11, 12, 22].

Большое внимание уделено анализу влияния погрешностей измерений и восстановления параметров на полученные результаты. В конце статьи проводится сравнение оптических параметров, полученных в самолетных радиационных измерениях НАСА и России. Представлены также результаты расчетов коротковолнового лучистого притока, скорости нагревания облачного слоя атмосферы и оценка водозапаса слоя облаков.

Данные наблюдений

Рассматриваемые данные NASA получены с помощью прибора Cloud Absorption Radiometer (CAR) [3, 4] над, под и внутри облачного слоя в рамках программы «Южно-африканская региональная научная инициатива 2000» 13 сентября 2000 г., у побережья Южной Африки на широте 20,0–21,7 ° с.ш. и долготе 13,0–13,7 ° в.д. (рис. 1, *а*). Высота полета менялась в диапазоне от 354 до 1170 м, как показано на рис. 1, *б*. При этом высота уровней полета под облачным слоем была от 343 до 404 м, внутри облака 405–790 м и над облаком 800–1178 м. Геометрическая толщина слоя облаков составила 400 м. Радиационный эксперимент длился 1 ч, среднее значение зенитного угла солнца $\theta_0 = 37,6^\circ$ ($\mu_0 = \cos\theta_0$).

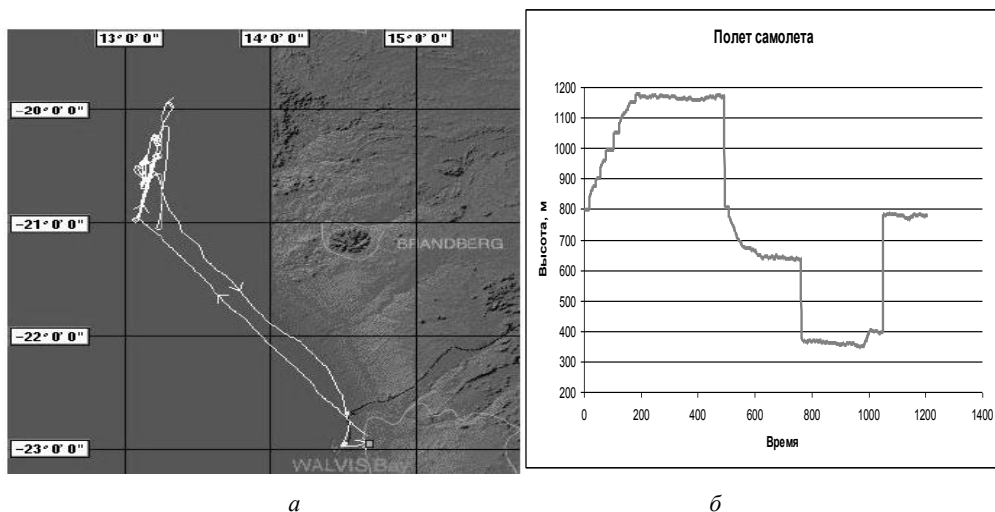


Рис. 1. Самолетный эксперимент 13.09.2000 с прибором CAR:

а – карта полета, *б* – схема полета

Радиометр CAR измерял интенсивность рассеянной солнечной радиации в зенитных углах визирования θ_i от зенита ($\theta_1 = 0^\circ$) до надира ($\theta_{180} = 180^\circ$) с шагом 1° в 8-ми спектральных каналах: 340; 381; 472; 682; 870; 1,035; 1,219; 1,273 нм. Запись данных в одном спектральном канале во всех углах визирования и на всех уровнях по высоте соответствует одному файлу данных.

Файл состоит из сканов. Один скан содержит географические координаты места наблюдения, местное время, зенитный угол солнца, азимутальный угол визирования относительно солнца, высоту наблюдения и 182 значения излучения I_i рассеянной солнечной радиации в относительных единицах потока от солнца на верхней границе атмосферы в зенитных углах визирования θ_i , показанные на рис. 2 для двух спектральных каналов. Таким образом, восходящая и нисхо-

дующая интенсивности измерены в 90 направлениях визирования. При обработке выбиралось по 70 направлений от надира и зенита, чтобы удовлетворить принятой модели плоского слоя. Параметры прибора CAR представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры прибора CAR и спецификация интегрирующих сферических источников, применяемых для калибровки

Диапазон углового сканирования	190°
Мгновенное поле зрения	17,5 мрад (1°)
Количество пикселей в скане	382
Скорость сканирования	1,67 скан/с
Спектральные каналы, мкм (ширина)	14 каналов: 0,340 (0,009), 0,381 (0,006), 0,472 (0,021), 0,682 (0,022), 0,870 (0,022), 1,036 (0,022), 1,219 (0,022), 1,273 (0,023), 1,556 (0,032), 1,656 (0,045), 1,737 (0,040), 2,103 (0,044), 2,205 (0,042), 2,302 (0,043)
Выходные каналы	9 каналов по 16 бит
Скорость регистрации данных	61,85 Мбит/ч
Вес прибора	42 кг
Радиометрическая калибровка	Интегральные по спектру источники: Hardy: диаметр 1,83 м, спектральный диапазон 0,4–2,3 мкм, внутреннее покрытие BaSO ₄ , число ламп 16 по 200 Вт/лампа, ток 6,51 А, стабильность <0,05 %. Slick: диаметр 1,22 м, спектральный диапазон 0,4–2,3 мкм, внутреннее покрытие спектралон, число ламп 16 по 45 Вт/лампа, ток 6,60 А, стабильность <0,03 %. Uncle: диаметр 0,51 м, спектральный диапазон 0,23–0,40 мкм, внутреннее покрытие BaSO ₄ , число ламп 4 по 150 Вт/лампа, ток 6,60 А, стабильность <0,03 %

Измерения внутри облака были произведены довольно близко к верхней границе облачности (высота уровней измерений от 800 до 600 м), где не установился, так называемый, диффузный режим поля радиации, что видно на рис. 2 по явно выраженным максимумам в солнечном ореоле на уровнях измерений внутри облачного слоя. Тем не менее, сделана попытка восстановления оптических параметров из измерений внутри облака для направлений визирования, близких к надиру и зениту, которая оказалась успешной для большинства подслоев между уровнями измерений.

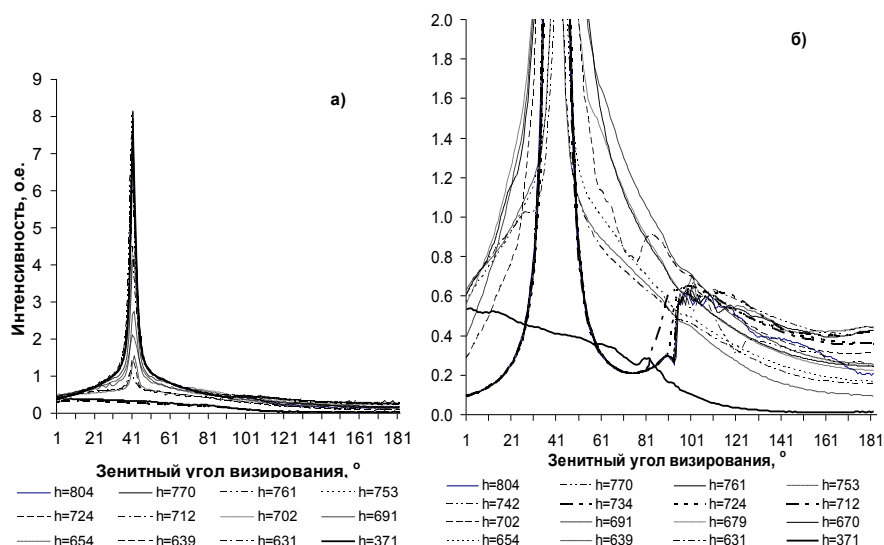


Рис. 2. Угловые зависимости интенсивности рассеянного солнечного излучения в относительных единицах над облаком, внутри и под облаком в спектральных каналах: а – 342 нм и б – 1273 нм. Внизу на рисунках указаны высоты уровней измерений

Погрешности измерений

Прибор CAR был тщательно калиброван по эталонным источникам яркости с использованием интегрирующих сферических систем [10]. Зависимости погрешностей прибора от угла визирования в лабораторных условиях не обнаружено. В работе [21] представлен анализ точности прибора CAR по сравнению с прибором MODIS при исследовании подстилающей поверхности. Результаты этого анализа характеризуют погрешности наблюдения подстилающей поверхности, но они показывают наличие влияния угла визирования на погрешность измерений прибором CAR с борта самолета.

Дело в том, что в условиях полета положение самолета определяется углами крена, тангажа и рыскания. Даже при стабильном полете эти углы подвержены случайным вариациям, что и определяет случайные погрешности измерения интенсивности рассеянной радиации в зависимости от направления визирования. Эти погрешности мы смогли оценить благодаря регистрации на каждой высоте полета по несколько сканов (от 4 до 10). В алгоритме обработки рассчитывалось среднее квадратичное значение интенсивности для каждого направления визирования по всем имеющимся сканам на данной высоте, затем вычислялись средние квадратичные отклонения от среднего значения, которые и принимались за случайные ошибки измерения интенсивности. Таким же образом оценивались средние отклонения значений зенитного угла солнца и угла азимута визирования. Подобная процедура проводилась на каждой высоте измерений, которые участвовали в дальнейшей обработке.

На рис. 3 показаны зависимости погрешностей измерения интенсивности от угла визирования по измерениям отраженной радиации над облаком (top) и пропущенной радиации под облаком (base).



Рис. 3
top

Занам:
OM

Метод обработки экспериментальных данных

Ранее ряд авторов (например, [11, 12, 22]) предлагали разные подходы для получения оптических параметров облака (оптической толщины τ_0 , альbedo однократного рассеяния α_0 , коэффициентов рассеяния α и поглощения κ). Однако эти подходы (как и многие другие, здесь не упомянутые) предполагали значительные ограничения на восстанавливаемые искомые параметры: полубесконечную оптическую толщину, равенство альbedo однократного рассеяния единице (консервативное рассеяние), отсутствие спектральной зависимости оптической толщины и др., и восстанавливали только один оптический параметр (или оптическую толщину, или альbedo однократного рассеяния). Здесь использован метод, подробно описанный в работах [3, 15–18], который не ставит таких ограничений, позволяет получить оба оптических параметра для каждой длины волны независимо и уже был применен к данным спутниковых и наземных наблюдений интенсивности и самолетных измерений потоков отраженной и пропущенной солнечной радиации. В настоящей статье для решения задачи используются данные измерений на верхней и нижней границах облака отдельно и совместно, а также данные измерений внутри облака. Алгоритм решения задачи представлен в работах [4, 7, 19]. Непосредственно определяются из измерений следующие оптические параметры облака: $s^2 = (1 - \alpha_0) / [3(1 - g)]$ — параметр подобия и $\tau' = 3(1 - g)\tau_0$ — приведенная оптическая толщина [15–17]. С учетом геометрической толщины всего облака или толщины подслоев между уровнями измерений легко перейти к объемным коэффициентам рассеяния $\alpha = \tau_0 / \Delta z$ и поглощения $\kappa = s^2 \tau / \Delta z$.

1. *Измеренные над облаком* многоугловые данные отраженной радиации на верхней границе облака дают интенсивность в относительных единицах ρ_i в углах визирования $\theta_i = \arccos \mu_i$. Рассматривается отношение двух разностей $[\rho_\infty(\mu_1, \mu_0, \varphi) - \rho_1] / [\rho_\infty(\mu_2, \mu_0, \varphi) - \rho_2]$, где ρ_1 и ρ_2 – наблюдаемые интенсивности в двух углах визирования $\arccos \mu_1$, $\arccos \mu_2$ и $\rho_\infty(\mu_i, \mu_0, \varphi)$ – коэффициент отражения полубесконечной консервативной атмосферы ($\tau_0 = \infty$, $\alpha_0 = 1$), который может быть рассчитан с использованием аппроксимаций [20]. После алгебраических преобразований были получены выражения для параметра подобия [16] и приведенной оптической толщины [11]:

$$s^2 = \frac{[\rho_0(\varphi, \mu_1, \mu_0) - \rho_1]K_0(\mu_2) - [\rho_0(\varphi, \mu_2, \mu_0) - \rho_2]K_0(\mu_1)}{[\rho_0(\varphi, \mu_2, \mu_0) - \rho_2]K_0(\mu_1) \left(\frac{K_2(\mu_1)}{K_0(\mu_1)} - \frac{K_2(\mu_2)}{K_0(\mu_2)} \right) - \frac{1,91a_2(\mu_0)K_0(\mu_1)K_0(\mu_2)}{2q'(1+g)}[\mu_1 - \mu_2]},$$

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

где $q' = 0,714$; константы m и l определяются свойствами рассматриваемой среды и рассчитываются по известным формулам [3, 15–18] после определения параметра s ; $K(\mu)$, $K_0(\mu)$ и $K_2(\mu)$ – функция выхода и коэффициенты ее разложения по малому параметру s ; $\alpha_2(\mu)$ – это второй коэффициент в разложении функции плоское альбедо. Вид этих функций известен и значения для известных углов солнца и визирования можно найти в таблицах или рассчитать по аппроксимационным формулам [20].

2. *Наблюдения под облаком*. Аналогичные выражения для случая многоугловых данных пропущенной интенсивности солнечной радиации под облаком получены в работе [16]:

$$s^2 = \left[\frac{\sigma_1 \bar{K}_0(\mu_2)}{\sigma_2 \bar{K}_0(\mu_1)} - 1 \right] \frac{1}{\frac{\bar{K}_2(\mu_1)}{\bar{K}_0(\mu_1)} - \frac{\bar{K}_2(\mu_2)}{\bar{K}_0(\mu_2)}},$$

$$\tau' = s^{-1} \ln \left[\frac{\sqrt{\bar{l} + r^2} + r}{\bar{l}} \right], \quad r = \frac{m\bar{K}(\mu_{1,2})K(\mu_0)}{2\sigma(\tau, \mu_{1,2}, \mu_0)}. \quad (2)$$

Черта сверху над обозначением функции $\bar{K}(\mu)$ и величины $\bar{l}$ указывает на учет альбедо подстилающей поверхности A .

3. *Совместные наблюдения над и под облаком*. Результаты совместных наблюдений над и под облаком также дают возможность получить s и τ' [4]:

$$s^2 = \frac{\bar{K}_0(\mu)^2(\rho_0 - \rho)^2 - K_0(\mu)^2\sigma^2}{\bar{K}_0(\mu)^2 \left[16K_0^2(\mu)K_0^2(\mu_0)s^2 - \frac{a_2(\mu)a_2(\mu_0)}{6q'}(\rho_0 - \rho) + (\rho_0 - \rho)^2 \left(2\frac{K_2(\mu)}{K_0(\mu)} - 9q'^2 \right) \right] - \sigma^2 K_0^2(\mu)G},$$

$$G = 27\bar{q}'^2 + \frac{2}{\bar{K}_0(\mu)} \left[\frac{A}{1-A} \left(12\bar{K}_0(\mu)\bar{q}' + 12q' \frac{A}{1-A} + a_2(\mu) + n_2 \right) + \bar{K}_2(\mu) \right],$$

$$\tau' = 3(1-g)\tau = \frac{1}{2s} \ln \left\{ I^2 \left(1 + \frac{2K_0(\mu)K_0(\mu_0)s(4-9s^2)}{(\rho_\infty - \rho)} \right) \left(1 - \frac{8As}{1-Aa^\infty} \right) \right\}. \quad (3)$$

Анализ области применимости используемого метода и формулы для погрешностей, которые используются для выполнения регуляризации полученных результатов, детально рассмотрены в [4, 7].

Надо отметить, что при учете альbedo подстилающей поверхности A возникает трудность получить его величину из измерений. Альbedo определено в терминах потоков, в нашем случае наблюдения включают в себя интенсивности радиации. Однако ранее было получено соотношение $A = I(48^\circ)/I(132^\circ)$ [19], которое используется здесь для определения альbedo подстилающей поверхности из измерений. При этом используются измерения, выполненные под облаком. Рассчитывается среднее значение альbedo по всем сканам на выбранной высоте 370 м, и оценивается среднее квадратичное отклонение определения альbedo поверхности. В табл. 2 представлены полученные значения альbedo и СКО в разных спектральных каналах.

Таблица 2

Значения альbedo подстилающей поверхности и СКО,
полученные из измерений прибором CAR

λ , мкм	0,340	0,381	0,472	0,682	0,870	1,035	1,219	1,273
A_s	0,0674	0,0706	0,0511	0,0464	0,0437	0,0422	0,0409	0,0441
СКО	0,0036	0,015	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0010	0,0012

Приведем формулы для определения оптических параметров из измерений внутри облака.

Для верхнего подслоя, примыкающего к верхней границе:

$$s^2 = \frac{9\mu^2(\rho_0 - \rho)^2 - 4J_1^2 K_0^2(\mu)}{9\mu^2 \left\{ 16K_0^2(\mu_0)K_0^2(\mu) + (\rho_0 - \rho)^2 \left(2\frac{K_2(\mu)}{K_0(\mu)} - \frac{a_2(\mu_0)a_2(\mu)}{6q'(\rho_0 - \rho)} - 9q'^2 - 9\mu^2 \left(1 - \frac{4I_1^\uparrow I_1^\downarrow}{J_1^2} \right) \right) \right\}},$$

$$\tau' = 3\tau(1-g) = \frac{1}{2s} \ln \left[I \frac{\left[I_1^\downarrow(1-6\mu s + 18\mu^2 s^2) - I_1^\uparrow \right] (\rho^\infty - \rho) + 4K_0(\mu_0)K_0(\mu)s + \frac{a_2(\mu_0)a_2(\mu)}{12q'} s^2}{\left[I_1^\downarrow - (1-6\mu s + 18\mu^2 s^2)I_1^\uparrow \right] (\rho^\infty - \rho) - 4K_0(\mu_0)K_0(\mu)s + \frac{a_2(\mu_0)a_2(\mu)}{12q'} s^2} \right]. \quad (4)$$

Обозначая $J_i = I_i^\downarrow - I_i^\uparrow$, имеем для внутренних подслоев облака:

$$s^2 = \frac{(J^2(\tau_i) - J^2(\tau_{i-1}))J^2(\tau_i)J^2(\tau_{i-1})}{36\mu^2[J^2(\tau_{i-1})I(\mu, \tau_i)I(-\mu, \tau_i) - J^2(\tau_i)I(\mu, \tau_{i-1})I(-\mu, \tau_{i-1})]},$$

$$\tau'_i - \tau'_{i-1} = 3(\tau_i - \tau_{i-1})(1-g) =$$

$$= \frac{1}{2s} \ln \left[\frac{[J(\tau_{i-1}) - 6I(\mu, \tau_{i-1})\mu s(1-3\mu s)]}{[J(\tau_{i-1}) + 6I(-\mu, \tau_{i-1})\mu s(1-3\mu s)]} \right] + \frac{1}{2s} \ln \left[\frac{[J(\tau_i) + 6I(-\mu, \tau_i)\mu s(1-3\mu s)]}{[J(\tau_i) - 6I(\mu, \tau_i)\mu s(1-3\mu s)]} \right]. \quad (5)$$

Для нижнего подслоя, примыкающего к нижней границе:

$$s^2 = \frac{9\mu^2\sigma^2 - 4\bar{K}_0^2(\mu)J_{n-1}^2}{9\mu^2\sigma^2 \left\{ 27q'^2 + \frac{2}{\bar{K}_0(\mu)} \left[\frac{A}{1-A} \left(a_2(\mu) + n_2 + 12 \left(\bar{K}_0(\mu)\bar{q}' + \frac{q'A}{1-A} \right) \right) + K_2(\mu) \right] \right\} - 9\mu^2J_{n-1}^2(I_{n-1}^\downarrow + I_{n-1}^\uparrow)^2},$$

$$\tau'_n - \tau'_{n-1} = 3(\tau_n - \tau_{n-1})(1-g) = \frac{1}{2s} \ln \left[\frac{2}{3\mu\sigma} \frac{I_{n-1}^\downarrow - I_{n-1}^\uparrow(1-6\mu \cdot s + 18\mu^2s^2)}{1-3\mu s + 9\mu^2s^2} \right] +$$

$$+ \ln \left[K_0(\mu)(1-3q's) + K_2(\mu)s^2 + \frac{A}{1-A} (1-3q's + n_2s^2)(1-4K_0(\mu)s + a_2(\mu)s^2) \right]. \quad (6)$$

Аналитическое представление решения обратной задачи позволяет получить формулы для погрешностей, вызванных предложенной процедурой обработки данных [4,7]. Они весьма громоздки, и приводить их здесь не будем. Погрешности, рассчитанные по этим формулам, используются для регуляризации окончательных результатов в алгоритме программы.

Учет горизонтальной неоднородности облачного слоя

Горизонтальная неоднородность верхней границы облака приводит к увеличению доли диффузной радиации, освещающей облако, которую необходимо учитывать при вычислении функций, определяющих геометрию задачи $K(\mu)$, $K(\mu_0)$, $\alpha_2(\mu)$, $\alpha_2(\mu_0)$, $\rho_0(\mu, \mu_0)$ [19]:

$$\rho(\mu, \mu_0) = \rho(\mu, \mu_0)(1-r) + ra(\mu),$$

$$K(\mu_0) = K(\mu_0)(1-r) + rn, \quad (7)$$

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

где сферическое альbedo α^∞ , плоское альbedo $\alpha(\mu_0)$ и величина n определяются как средневзвешенные по косинусу угла визирования μ , величины соответствующих функций.

Для определения параметра горизонтальной неоднородности верхней границы облака r рассчитывается оптическая толщина в предположении консервативного рассеяния, что предусмотрено в алгоритме обработки данных. Параметр неоднородности вычисляется по формуле

$$r = \frac{1}{N\bar{\tau}} \sqrt{\sum_{i=1}^N |\tau_i - \bar{\tau}|^2}, \quad (8)$$

где N – число рассматриваемых направлений визирования, а оптическая толщина получена в предположении консервативного рассеяния на первом этапе обработки. Среднее по углам визирования значение консервативной оптической толщины и параметр r приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты определения оптических параметров облака
из самолетных радиационных наблюдений над и под облаком

λ , мкм		0,340	0,381	0,472	0,682	0,870	1,035	1,219	1,273
τ <i>Conserv</i>	Base	28,0	18,2	21, 84	13,0	11,1	11,7	13,9	15,3
	Top	9,8	11,7	16,4	22,3	23,8	36,5	20,0	18,2
	Top+Base	13,2	11,3	16,1	28,9	14,1	18,44	13,8	12,0
τ	Base	41,9	33,9	34,0	29,6	25,4	27,4	21,1	18,7
	Top	10,0	11,9	16,8	23,3	25,2	10,30	5,62	7,41
	Top+Base	24,6	28,2	29,7	26,5	16,6	18,8	24,0	21,4
MSD τ		0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
σ , км ⁻¹	Base	104,8	84,6	85,0	72,29	63,6	68,5	67,0	72,0
	Top	25,2	29,7	42,0	58,3	63,0	91,2	52,7	46,9
	Top+Base	61,5	70,5	74,2	66,3	41,5	47,0	60,0	53,5
r	Base	0,067	0,064	0,066	0,063	0,053	0,061	0,053	0,056
	Top	0,009	0,01	0,004	0,006	0,007	0,012	0,010	0,004
	Top+Base	0,0150	0,015	0,015	0,017	0,022	0,060	0,0155	0,0169
ω_0	Base	0,996964	0,996529	0,996435	0,996194	0,996004	0,995422	0,995393	0,995828
	Top	0,999796	0,999733	0,999718	0,999670	0,999624	0,999632	0,999621	0,999640
	Top+Base	0,970319	0,989642	0,996325	0,99649	0,99786	0,99683	0,999555	0,99547
$1 - \omega_0$	Base	0,003036	0,003581	0,003565	0,003806	0,003996	0,004578	0,004607	0,004172
	Top	0,000264	0,000267	0,000282	0,000330	0,000376	0,000368	0,000379	0,000360
	Top+Base	0,029681	0,010358	0,003675	0,00361	0,00214	0,33134	0,000445	0,00453
κ , км ⁻¹	Base	0,3182	0,3031	0,3029	0,2813	0,2541	0,3135	0,3086	0,3005
	Top	0,0066	0,0079	0,0118	0,0192	0,0240	0,0336	0,0200	0,0169
	Top+Base	0, 9813	0, 2931	0, 2726	0,1687	0,0937	0,1196	0, 0267	0,1638
MSD ω		0,0008	0,009	0,004	0,004	0,004	0,004	0,024	0,006

Регуляризация решения

Напомним, что в эксперименте измеряются интенсивности рассеянной солнечной радиации. Поэтому, как уже было сказано выше, случайные вариации углов, определяющих полет самолета, влияют на погрешности измерений и провоцируют угловую зависимость погрешностей. Вычисление этих погрешностей облегчается 6–10-кратным повторением регистрации сканов на каждом

уровне измерений. На рис. 3 представлены СКО интенсивности, измеренной на высоте 800 м над облаком (top) и 370 м под облаком (base). Полученные погрешности были использованы при проведении регуляризации результатов с учетом неравноточности процедуры измерения и восстановления по вышеприведенным формулам. При этом применялась формула [2]:

$$x = \frac{\sum_i x_i \frac{1}{(\Delta x_i)^2}}{\sum_i \frac{1}{(\Delta x_i)^2}}, \quad (9)$$

где x_i – искомый параметр для i -го значения угла визирования; Δx_i – рассчитываются по формулам для косвенных погрешностей, получаемым на основе соответствующих формул для восстановления искомого параметра.

На рис. 4 показаны нерегуляризованные результаты восстановления оптической толщины и параметра s^2 в зависимости от угла визирования.

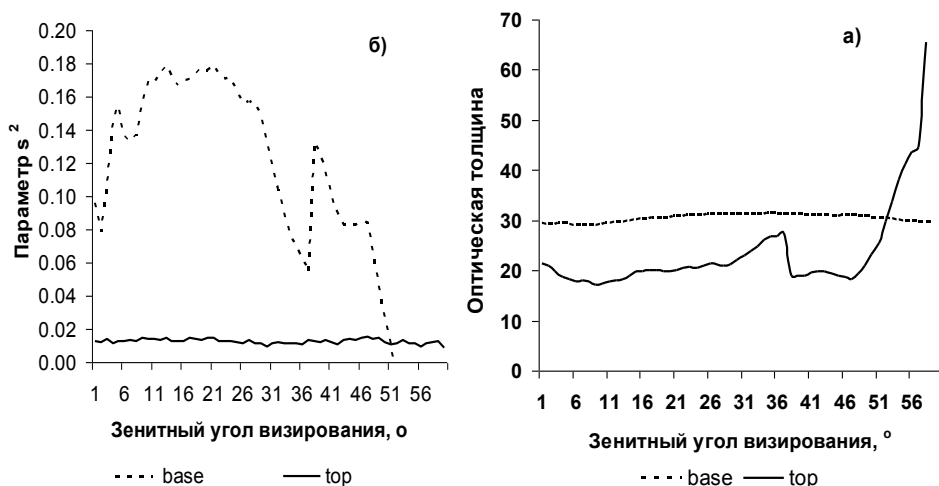


Рис. 4. Оптические параметры, восстановленные для разных углов визирования: *а* – оптическая толщина, *б* – параметр подобия s^2 ; top – полученные из измерений над облаком, base – из измерений под облаком

Видно, что только оптическая толщина, восстановленная из измерений под облаком (рис. 4, *а*, base) практически не зависит от угла визирования (как и должно быть в идеальном случае). Регуляризация в данном примере дает для параметра s^2 значения 0,011652, в то время как простое усреднение без учета зависимости погрешностей от угла визирования приводит к значению 0,013034. Разница оказывается довольно существенной: соответствующие величины доли поглощенной радиации (лучистого притока) в слое оцениваются как 0,217 и 0,237.

Полученные результаты

Два параметра (параметр подобия s^2 и приведенная оптическая толщина τ') для всего облака в целом восстановлены с применением вышеприведенных формул для наблюдений над облаком (top) на высоте 800 км, под облаком (base) на высоте 370 км и для совместных данных (top+base). В случаях обработки измерений над или под облаком в отдельности значения s^2 находятся последовательным перебором всех возможных пар измерений интенсивности радиации в двух углах визирования. Анализируются данные измерений в диапазоне зенитных (для пропущенной радиации) и надирных (для отраженной радиации) углов визирования от 0 до 70°. Более близкие к горизонту значения углов визирования не рассматриваются из-за увеличения погрешностей применения модели плоского слоя. В процессе обработки рассматриваются только те пары углов визирования, которые отвечают требованиям близости значений оптической толщины, определенной в приближении консервативного рассеяния (с точностью 0,5 %) и отличия косинусов углов визирования в паре на 0,1. Несмотря на ограничения, количество пар очень большое для 70 направлений, поэтому применена случайная выборка из пар, обеспечивающая наименьшую погрешность. Далее полученные значения искомых параметров усредняются по всем рассматриваемым парам с весом, равным обратной величине погрешности восстановления для регуляризации решения. В алгоритме обработки предусмотрена оценка среднеквадратических отклонений (СКО) результатов. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Следует отметить некорректность предположения о консервативности рассеяния света в коротковолновом диапазоне при определении оптической толщины, которое часто используется в коротковолновой области спектра для облака другими авторами [11, 12, 22], очевидную при сравнении значений τ , полученными без (консервативное рассеяния) и с учетом поглощения света в облаке.

Для получения альбедо однократного рассеяния α_0 , оптической толщины τ_0 и коэффициента рассеяния α спектральные значения параметра асимметрии g были приняты согласно [6, 23].

На рис. 5 представлены вертикальные профили оптической толщины и альбедо однократного рассеяния для всех 8-ми спектральных каналов, указанных на рисунке, полученные из анализа данных внутри облака. Надо иметь в виду, что погрешности этих результатов больше, чем при обработке данных, измеренных над или под облаком, вследствие того, что измерения проводились слишком близко к верхней границе облака. С одной стороны, сильные вариации восстановленных величин связаны со значительными погрешностями восстановления, с другой стороны, они в основном повторяются на всех длинах волн, что может указывать на реальную неоднородность облака по вертикали. Окон-

чительно можно заключить, что, по-видимому, необходимо провести некоторую процедуру сглаживания по высоте, которая будет разработана в дальнейших исследованиях.

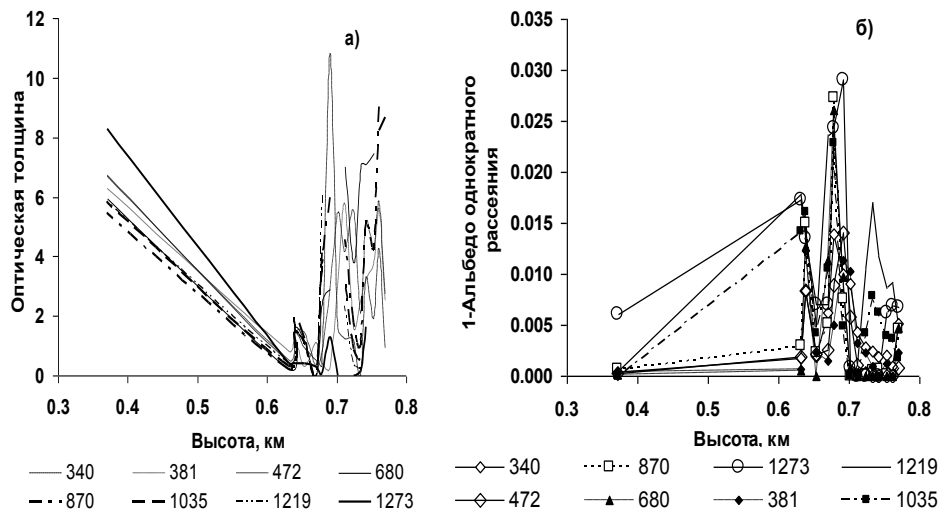


Рис. 5. Вертикальный профиль: *а* – оптической толщины; *б* – 1-альбеда однократного рассеяния для 8 спектральных каналов (указаны на рисунке)

Анализ полученных оптических параметров облака

Для коэффициента объемного поглощения имеем простое соотношение $\kappa = s^2 \tau' / \Delta z$, где Δz – это геометрическая толщина между уровнями наблюдения, параметр индикатрисы рассеяния не требуется для получения значения κ . Объемный коэффициент рассеяния определяется выражением $\alpha = \tau'(3 - 3g) / \Delta z - \kappa$ и необходимо задать параметр индикатрисы [6, 23].

Видно, что полученные значения оптической толщины и альбеда однократного рассеяния различаются при обработке данных над облаком и под облаком, что с одной стороны, отражает вертикальную неоднородность облачного слоя, но с другой стороны – влияние погрешности измерений. Над облаком сильнее влияет неоднородность верхней границы облачного слоя, а под облаком больше сказывается болтанка самолета. Заметим, что результаты обработки самолетных измерений NASA выявили явную спектральную зависимость коэффициента рассеяния и оптической толщины, которые отмечались по результатам обработки измерений другими приборами и методами [3, 15–18].

На рис. 6, *а* показана спектральная зависимость оптической толщины, полученная из российских самолетных спектральных измерений, выполненных в 1974 г. в рамках международной научной программы GATE [13] в слоистых облаках над Атлантикой у берегов Северо-Западной Африки (сплошные и пунктирные линии) [9] и результаты, полученные из наблюдений НАСА (тре-

угольники). Видно хорошее согласие и значений, и спектральной зависимости результатов, полученных из измерений разных радиационных характеристик, проведенных в разное время и разными приборами.

На рис. 6, б представлены спектральные значения величины единица минус альbedo однократного рассеяния ($1 - \alpha_0$), полученные в результате обработки данных упомянутых выше российских экспериментов. Следует упомянуть, что наблюдения по программе GATE проводились после сильного выноса песка из Сахары в результате пыльной бури [13], поэтому поглощение в облаке в 2 раза больше, чем в случае наблюдений НАСА в 2000 г.

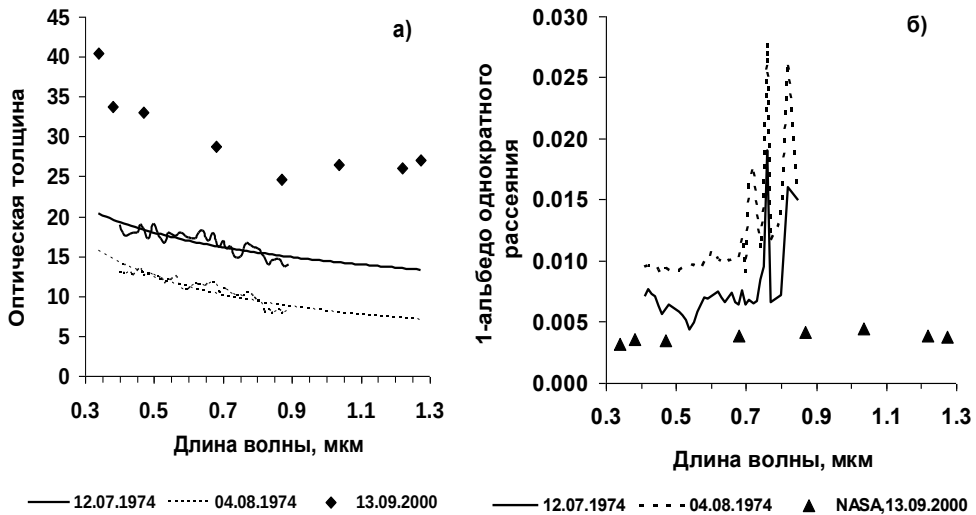


Рис. 6. Спектральные значения: а – оптической толщины и б – величины 1-альbedo однократного рассеяния слоистого облака, полученных из самолетных измерений у западного берега Африки: а – Северо-запад 1974 г. и б – Юго-запад 2000 г.

Другие характеристики облака

Альbedo подстилающей поверхности представлено на рис. 7, а вместе с результатами, полученными в эксперименте по программе GATE-1974 и измерениями над Ладожским озером в 1985 г. [15, 17] над водной поверхностью. Подчеркнем, что в УФ интервале все представленные результаты демонстрируют влияние подоблачного слоя атмосферы в УФ области, связанное с релеевским рассеянием. Спектральная зависимость в случае GATE-1974 указывает на влияние подоблачного слоя атмосферы также и в полосе поглощения кислорода 0,762 мкм.

Измерения над океаном и в 1974, и в 2000 гг. выполнялись на высоте 400–500 м, и величина альbedo на нижнем уровне измерения характеризует альbedo системы поверхность – подоблачный слой атмосферы. Нижний уровень измерений в 1985 г. находился ниже, на высоте 100 м, поэтому подоблачная атмо-

сфера влияет значительно слабее и почти не увеличивает альbedo поверхности. Высокое содержание пылевого аэрозоля в эксперименте «12 July 1974» спровоцировало сильное рассеяния света и более высокое значение альbedo системы подстилающая поверхность – подоблачный слой. Обратим внимание на практически совпадающие результаты альbedo поверхности океана в случае измерений над Атлантикой «4 Aug 1974» и «13 Sep 2000».

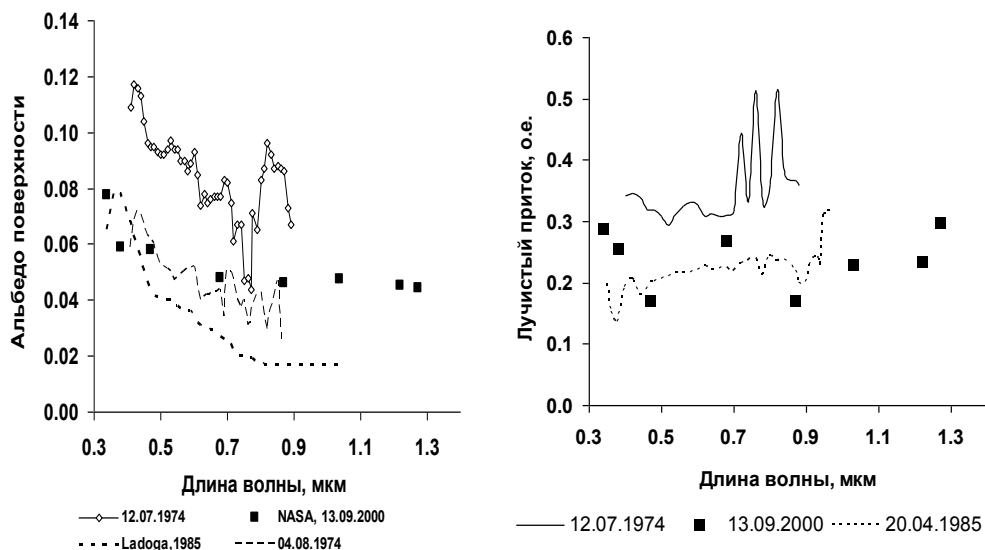


Рис. 7. Спектральная зависимость: а – альbedo водной поверхности и б – лучистого притока солнечной радиации в слое 1 км в относительных единицах от падающего солнечного потока над Атлантическим океаном 1974 и 2000 гг. и Ладожским озером 1985 г.

Полезно для оценки коротковолнового радиационного форсинга рассчитать величину лучистого притока радиации в облачном слое на основе измеренных потоков солнечной радиации по следующей формуле [3,18]:

$$dR(\mu_0) = \left[(F^\downarrow - F^\uparrow)_{top} - (F^\downarrow - F^\uparrow)_{base} \right] / \Delta z, \quad (10)$$

где $F^\downarrow$ и $F^\uparrow$ – нисходящий и восходящий полусферические потоки на верхней и нижней границе облака соответственно.

При измерениях полусферических потоков солнечной радиации на верхней и нижней границах слоя можно прямо применить уравнение (10) к измеренным характеристикам, что и было сделано для наблюдений «12 Jul 1974» (толщина облака 0,9 км) и «Ladoga 1985» над Ладожским озером (толщина облака 1,1 км). Соответствующие результаты представлены на рис.7б сплошной и пунктирной линиями. В случае наблюдений НАСА лучистый приток рассчитывался методом Эддингтона на основе полученных оптических параметров облака и обозначен на рисунке черными квадратами.

Определение оптической толщины позволяет оценить водность облака, что важно для прогноза количества осадков. Известно простое соотношение между этими величинами [5, 9]:

$$W = \frac{Q10^3}{\Delta z} = \frac{\tau r \rho}{1,5\Delta z}, \quad (11)$$

где W – водность облака, г/м³; Q – водозапас, кг/м²; Δz – геометрическая толщина облака; r – средний эффективный радиус капли; ρ – плотность воды. Поскольку определение оптической толщины из измерений под облаком имеет наименьшую погрешность и почти не зависит от угла визирования (как и должно быть в идеальном случае), то выберем значение оптической толщины на длине волны 1 мкм $\tau = 25$. Средний размер капель в облаке зависит от температуры нижней границы облака (°C) и от высоты над нижней границей (км), его можно оценить по аппроксимирующей формуле [9]:

$$r = 5(1 + 4,8 \cdot 10^{-2}\theta + 2 \cdot 10^{-2}\theta^2)(1 + 0,165z + 1,105z^2). \quad (12)$$

Принимая температуру нижней границы облака 15 °C и учитывая, что высоты нижней и верхней границ облака равны 400 и 800 м соответственно, получим для среднего радиуса $r = 9,1$ мкм. Так как толщина облака $\Delta z = 400$ м и плотность воды 1 г/см³, имеем для водности $W = 0,375$ г/м³, а для водозапаса облака $Q = 0,15$ кг/м². Оценки по формуле, приведенной в [9],

$$Q = 1,13(1 + 3,7 \cdot 10^{-2}\theta)(1 + 5,0z - 6,0z^2 + 2,1z^3) \quad (13)$$

дают соответственно: $W = 0,358$ г/м³ и $Q = 0,143$ кг/м².

Заключение

Рассматриваемые данные самолетных наблюдений позволяют осуществить всесторонний анализ облака с точки зрения строгой теории переноса излучения. Рассматриваемый эксперимент послужил основой для создания детального алгоритма обработки данных аналогичных измерений. Следует отметить, что измерения интенсивности сильнее подвержены влиянию случайных вариаций ориентации самолета, чем измерения полусферических потоков. Однако регистрация по несколько сканов на каждой высоте позволяет оценить возникающую случайную погрешность, а большое количество направлений визирования позволяет провести регуляризацию результатов. Процедура обработки данных определяется погрешностями измерений и метода решения обратной задачи.

Следует особо подчеркнуть, что аналитический подход для решения обратной задачи (получение оптических параметров облака и их вертикального профиля) имеет преимущества по сравнению с методами решения других авторов. В частности, он не ставит дополнительные ограничения и не накладывает связей на искомые параметры, поэтому обеспечивает результаты более близкие

к реальной природе. Формулы для погрешностей прямо получаются из формул для определения искомых параметров, что позволяет непосредственный анализ устойчивости решения и его регуляризацию.

Результаты, полученные при применении аналитического метода решения обратной задачи к данным измерений NASA, хорошо согласуются с результатами, полученными ранее из данных спектральных измерений полусферических потоков в облаке другим прибором. Совместимость результатов, полученных для разных регионов (Северо-запад и Юго-запад Африки) и в разное время (июль, август 1974 г. и сентябрь 2000 г.) могут указывать на слабую изменчивость основных оптических параметров слоистой облачности в тропиках.

Литература

1. *Алдошкина Е.С., Кузнецов А.Д., Пугачев А.А., Сероухова О.С., Симакина Т.Е., Чукин В.В.* Опыт использования аппарата нейронных сетей для анализа и прогноза временного ряда температуры воздуха // Уч. зап. РГГМУ, 2009, № 11, с. 91-110.
2. *Васильев А.В., Мельникова И.Н.* Методы прикладного анализа результатов натурных измерений в окружающей среде. – СПб.: Изд-во БГТУ «Военмех», 2009. – 370 с.
3. *Васильев А.В., Мельникова И.Н.* Экспериментальные модели атмосферы и земной поверхности. (Учебное пособие). – СПб.: Изд-во БГТУ «Военмех», 2010. – 226 с.
4. *Гения М.Д., Мельников И.Н., Гатебе Ч.* Определение оптических параметров облачной атмосферы из самолетных спектральных измерений интенсивности солнечной радиации // Сб. «Экология и космос». – СПб.-Петродворец. 8–9 февраля, 2010, с. 50-59.
5. *Ивлев Л.С., Мельникова И.Н.* Определение микрофизических параметров слоистого облака. ДАН, т. 350, № 6, 1996, с. 816-818.
6. *Лобанова М.А., Васильев А.В., Мельникова И.Н.* Зависимость параметра индикатрисы рассеяния т характеристик среды // Сб. ИКИ РАН «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», т. 7, 2010, № 4, с. 147-157.
7. *Мванго Г.Д., Мельникова И.Н., Гатебе Ч.* Аналитическое решение обратной задачи оптики облаков в применении к самолетным измерениям интенсивности рассеянной солнечной радиации // Сб. ИКИ РАН «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», т. 7, 2010, № 1, с. 99-111.
8. *Мельникова И.Н., Никитин С.А., Гатебе Ч.* Алгоритм восстановления оптических параметров протяженной облачности из самолетных спектральных измерений интенсивности солнечной радиации // Сб. ИКИ РАН «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 2009, с. 176-186.
9. *Облака и облачная атмосфера.* Справочник / Под ред. И.П. Мазина, А.Х. Хргиана. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 647 с.
10. *Gatebe C. K., Butle J. J., Cooper J. W., Kowalewski M., King M. D.* Characterization of errors in the use of integrating-sphere systems in the calibration of scanning radiometers // *Applied Optics.*, vol. 46, No. 31, 2007, p. 7640-7651.
11. *King M.D.* Determination of the scaled optical thickness of cloud from reflected solar radiation measurements // *J. Atmos. Sci.*, vol. 44, 1987, p. 1734–1751.
12. *King M.D., L. Radke L, Hobbs P.V.* Determination of the spectral absorption of solar radiation by marine stratocumulus clouds from airborne measurements within clouds // *J. Atmos. Sci.*, vol. 47, 1990, p. 894–907.
13. *Kondratyev K.Ya., Binenko V.I., Vasilyev O.B., Grishechkin V.S.* Spectral radiative characteristics of stratus clouds according CAENEX and GATE data // *Proceedings of Symp. Rad. in Atm. Garmisch-Partenkirchen.* Science Press., 1976, p. 572-577.
14. *Melnikova I., Nikitin S., Gatebe Ch.* The Algorithm of Cloud Optical Parameters Retrieval from Air-

- borne Observations of Solar Diffuse Radiance // Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing of Environment. May 4-8. Stresa. Lago Maggiore. Italy, 2009, p. 368-362.
15. *Melnikova I.N., Mikhailov V.V.* Spectral scattering and absorption coefficients in strati derived from aircraft measurements // *J. Atmos. Sci.*, vol. 51, 1994, p. 925-931.
 16. *Melnikova I.N., Domnin P.I., Radionov V.F., Mikhailov V.V.* Optical clouds characteristics derived from measurements of reflected or transmitted solar radiation // *J. Atmos. Sci.*, vol. 57, No. 6, 2000, p. 2135-2143.
 17. *Melnikova I.N., Mikhailov V.V.* Vertical profile of spectral optical parameters of strati clouds from airborne radiative measurements // *J. Geophys. Res.*, vol. 106, No D21, 2001, p. 27465-27471.
 18. *Melnikova I., Vasilyev A.* Short-wave solar radiation in the Earth atmosphere. Calculation. Observation. Interpretation. Springer-Verlag GmbH&Co.KG. Heidelberg, 2004. – 320 p.
 19. *Melnikova I., Genya J.M., Gatebe Ch. K.* Comparing products of processing airborne NASA and Russian cloud data // Proceedings of 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment. The GEOSS Era: Towards Operational Environmental Monitoring. Sydney. 10-15 April, 2011, p. 254-255.
 20. *Melnikova I.N., Dlugach Zh.M., Nakajima T., Kawamoto K.* On reflected function calculation simplification in case of cloud layers // *Applied Optics*, vol. 39, 2000, p. 541-551.
 21. *Román M.O., Gatebe C.K., Schaaf C.B., Poudyal R., Wan Zh., King M.D.* Variability in surface BRDF at different spatial scales (30 m–500 m) over a mixed agricultural landscape as retrieved from airborne and satellite spectral measurements // *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, 2011, p. 2184–2203.
 22. *Rozanov V.V., Kokhanovsky A.A.* Semianalytical cloud retrieval algorithm as applied to the cloud top altitude and the cloud geometrical thickness determination from top-of-atmosphere reflectance measurements in the oxygen A band // *J. Geophys. Res.*, vol. 10, D05202, 2004, p. 27235-27241.
 23. *Stephens G.L.* Optical properties of eight water cloud types // Technical Paper of CSIRO. Atmos. Phys. Division Aspendale. Australia, vol. 36, 1979, p. 1–35.
 24. *Wallace. John M., Hobbs P.V.* Atmospheric Science (an introductory survey). Academic Press., 1977. – 467 p.