

## Учет погрешностей и регуляризация результатов решения обратной задачи оптики облаков в коротковолновой области спектра

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

*Российский государственный гидрометеорологический университет  
Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: melnikova.irina@pobox.spbu.ru*

В работе рассматриваются результаты решения обратной задачи оптики облаков на основе самолетных радиационных измерений в коротковолновой области спектра. Алгоритм обработки результатов самолетных радиационных измерений НАСА и полученные при этом результаты представлены ранее (Мельникова и др., 2009; Геня и др., в печати). В данной работе анализируется влияние погрешностей измерений, схемы расчета угловых функций и метода решения обратной задачи оптики облаков на точность восстановления оптических параметров. Поскольку в работе использован аналитический подход на основе обратных асимптотических формул теории переноса, то вычисление погрешностей восстановления оптических параметров выполняется аналитически. Изложена процедура регуляризации решения. Получены значения искоемых параметров в восьми спектральных каналах из измерений над, под облаком и внутри облака на 16 уровнях. Результаты сравниваются с оптическими параметрами, полученными из российских самолетных спектральных измерений потоков солнечной радиации, выполненных в 70–80-х годах в Ленинградском (теперь Санкт-Петербургском) университете.

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

### Введение

Предлагаемая работа носит методический характер. В публикации рассматривается влияние случайных погрешностей самолетных измерений интенсивности рассеянной солнечной радиации и систематических погрешностей нарушения области диффузного режима на искомые параметры при аналитическом решении рассматриваемой обратной задачи оптики облаков. Погрешности восстановления искоемых параметров оцениваются в алгоритме и учитываются для регуляризации решения, что обеспечивает возможность их усреднения по углам визирования. В статье кратко описываются экспериментальные данные и метод их обработки, который более подробно изложен в предыдущих публикациях авторов (Мельникова и др., 2009; Геня и др., 2013; Melnikova et al., 2000). Конечным результатом обработки экспериментальных данных является восстановление оптических

параметров исследуемого облачного слоя (оптическая толщина, альbedo однократного рассеяния, объемные коэффициенты рассеяния и поглощения) и альbedo подстилающей поверхности. Следует отметить, что примененный здесь метод можно считать вполне успешным и обеспечивающим результат наиболее адекватный реальной природе, так как он не требует априорных ограничений и наложения связей на искомые параметры по сравнению с подходами других авторов (King, 1987; King et al., 1990; Rozanov et al., 2004). Кроме того, только этот метод позволяет получить одновременно два параметра (оптическую толщину и альbedo однократного рассеяния) независимо для каждого спектрального канала (Melnikova, Vasilyev, 2004).

### Данные наблюдений

Анализируемые данные получены в NASA с помощью прибора Cloud Absorption Radiometer (CAR) (King, 1987; King et al., 1990) в рамках программы «Южно-африканская региональная научная инициатива 2000» 13 сентября 2000 г. у побережья Южной Африки на широте 20,0–21,7° ю. ш. и долготе 13,0–13,7° в. д. при высоте полета от 354 до 1170 м (Gatebe et al., 2003). Измерения были выполнены под облаком (343–404 м), внутри (405–790 м) и над облаком (799–1178 м). В совокупности это составило более 1000 уровней по высоте. Геометрическая толщина протяженного слоя облаков 400 м. Радиационный эксперимент длился 1 час; при этом среднее значение зенитного угла Солнца составило 37,6° ( $\mu_0 = \cos \theta_0$ ).

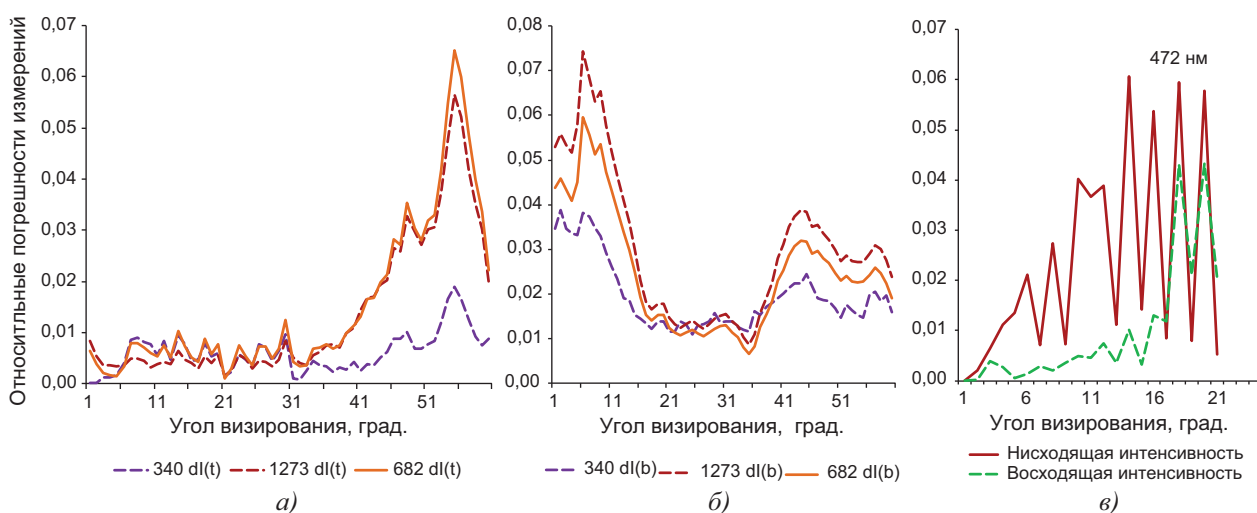
Параметры прибора и особенности его калибровки подробно описаны в (Gatebe et al., 2007; Román et al., 2011). Радиометр CAR измеряет интенсивность рассеянной солнечной радиации в 8 спектральных каналах 340, 381, 472, 682, 870, 1035, 1219, 1273 нм и в зенитных углах визирования  $\theta_i$  от зенита ( $\theta_1 = 0^\circ$ ) до надира ( $\theta_{180} = 180^\circ$ ) с шагом 1°. При обработке выбиралось по 70–80 направлений от надира и зенита, чтобы удовлетворить принятой модели плоского слоя.

Измерения внутри облака были произведены довольно близко к верхней границе облачности (высота уровней измерений варьировалась от 800 до 600 м) там, где не установился диффузный режим поля радиации. Тем не менее, попытка восстановления оптических параметров из измерений внутри облака для направлений визирования близких к надиру и зениту и удаленных от направления на солнечный ореол оказалась успешной для большинства подслоев между уровнями измерений.

### Погрешности измерений

Прибор CAR был тщательно калиброван по эталонным источникам яркости с использованием интегрирующих сферических систем (Gatebe et al., 2003). Зависимости погрешностей прибора от угла визирования в лабораторных условиях не обнаружено. Для решения поставленной здесь задачи важны погрешности, которые в условиях полета

определяются положением самолета – 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 (Melnikova, Vasilyev, 2004). Эти погрешности оцениваются путем усреднения результатов измерений интенсивности по нескольким сканам (от 4 до 10) на каждой высоте полета. Рассчитываются средние квадратичные отклонения (СКО) от среднего значения интенсивности для каждого направления визирования по всем имеющимся сканам на данной высоте (до 10 сканов), которые и принимаются за случайные ошибки измерения интенсивности.



*Рис. 1. Случайные относительные погрешности самолетных измерений рассеянной интенсивности солнечной радиации, выполненных а) над облаком (t) – отраженная радиация на высоте 799 м; б) под облаком (b) – пропущенная радиация на высоте 370 м; в) внутри облака (восходящая и нисходящая радиация на высоте 670 м). Спектральные каналы указаны на рисунке*

Таким же образом оценивались средние отклонения значений зенитного угла Солнца и угла азимута визирования. Подобная процедура проводилась на каждой высоте измерений, которая участвовала в обработке. На рис. 1 показаны зависимости погрешностей измерения интенсивности над (а), под (б) и внутри (в) облака в зависимости от угла визирования в УФ, видимом и БИК спектральных каналах. Максимальные значения погрешности составили 6–7% в зависимости от спектрального канала, причем наблюдается заметная зависимость величины погрешности измерения от угла визирования.

### Метод обработки экспериментальных данных

Для решения задачи использован метод, подробно описанный в работах (Мельникова и др., 2009; Гения и др., в печати; Melnikova et al., 2000), который уже был применен к данным спутниковых и наземных измерений интенсивности солнечной радиации. Рассмотрены данные измерений на верхней и на нижней границе облака и внутри облака. Непосредственно определяются из измерений следующие оптические параметры облака:

$s^2 = (1-\omega_0)/[3(1-g)]$  – параметр подобия и  $\tau' = 3(1-g)\tau_0$  – приведенная оптическая толщина. Для получения альbedo однократного рассеяния  $\omega_0$ , оптической толщины  $\tau_0$  и коэффициента рассеяния  $g$  необходимы спектральные значения параметра асимметрии  $g$ , которые были приняты согласно (Stephens, 1979).

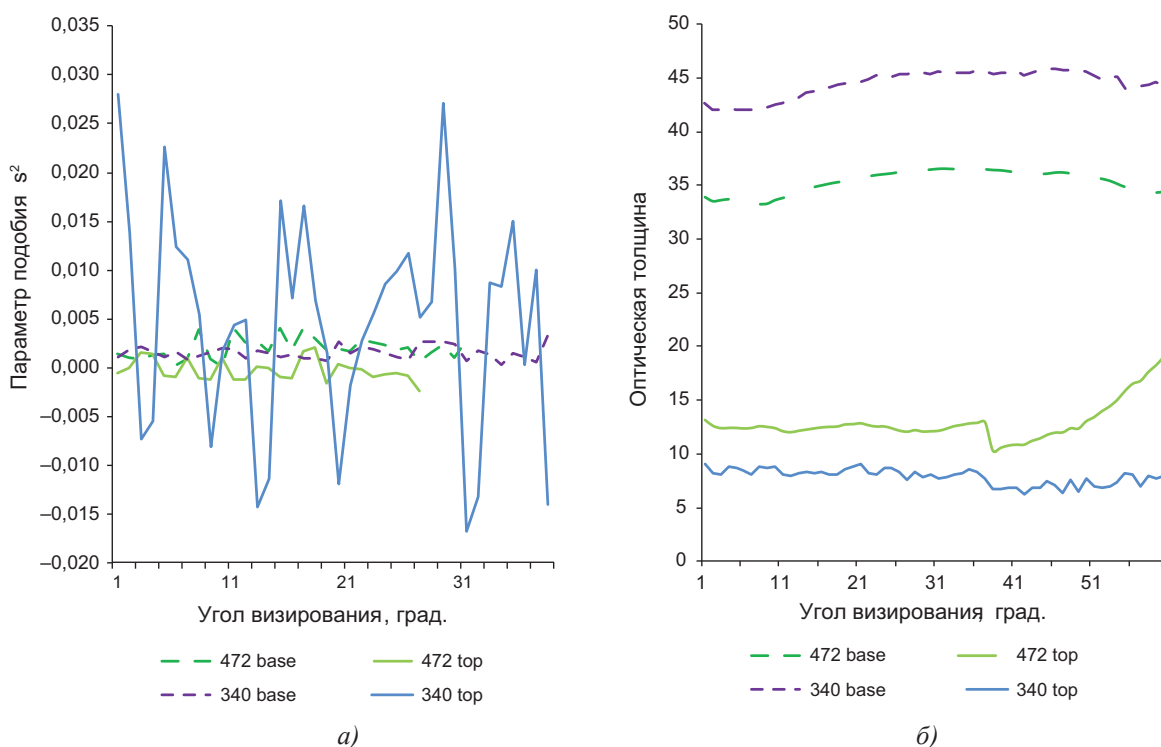
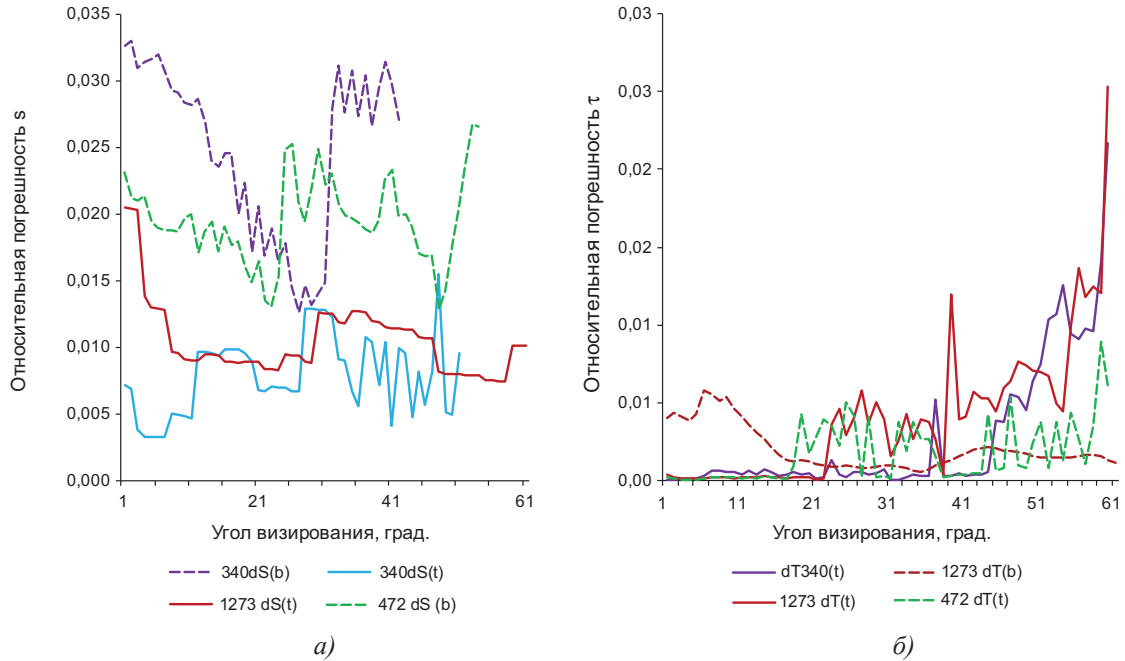


Рис. 2. Значения восстановленных параметров: а) параметра подобия  $s^2$  и оптической толщины  $\tau$  в зависимости от угла визирования из измерений над облаком (top) и под облаком (base) для двух спектральных каналов

В случаях обработки измерений над или под облаком использованный метод требует одновременно рассматривать интенсивность в двух углах визирования. Поскольку обрабатываемые данные содержат по 90 углов визирования для направлений вверх и вниз, то есть возможность определить значения  $s^2$  последовательным перебором всех возможных пар углов визирования и соответствующим анализом интенсивностей радиации в этих углах. 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 не менее, чем на 0,1.

Аналитические формулы решения обратной задачи позволяют получить формулы для погрешностей, вызванных предложенной процедурой обработки данных, которые приводятся в (Мельникова и др., 2009). Погрешности, рассчитанные по этим формулам, суммируются с погрешностями измерений и используются для регуляризации окончательных результатов в алгоритме программы. Оптические параметры восстанавливаются для всех рассматриваемых направлений визирования. Понятно, что в идеальном случае однородного облака и отсутствия погрешностей измерений зависимости от угла визирования не было бы. На рис. 2 представлены восстановленные параметры  $\tau$  и  $s^2$  для разных углов

визирования, откуда видно, что полученные результаты весьма изменчивы в зависимости от направления визирования (типичным для решения обратной задачи образом), поэтому встает вопрос о методе их усреднения для получения адекватного природе значения. Погрешности восстановления параметров, которые тоже сильно зависят от угла визирования, показаны на *рис. 3*.



*Рис. 3. Значения относительной погрешностей восстановления а) параметра подобия и б) оптической толщины, по измерениям над (сплошная линия, t) и под облаком (пунктирная линия, b)*

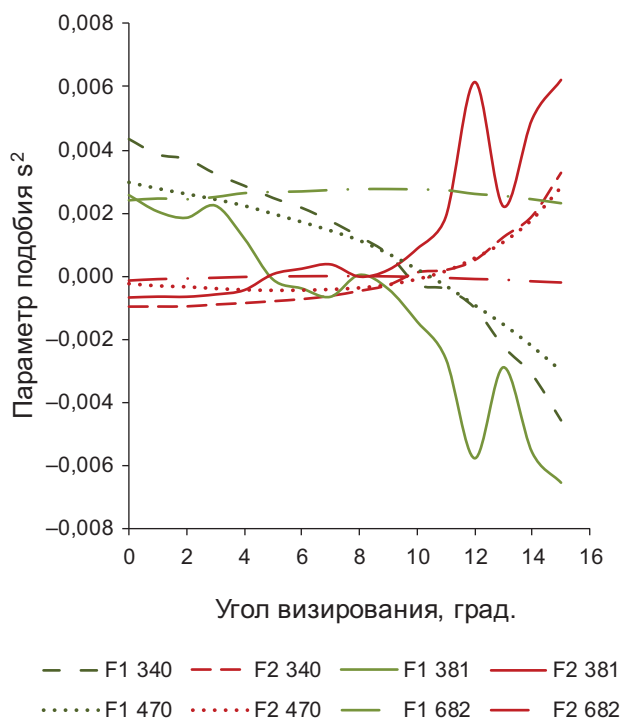
В некоторых случаях, например, при рассмотрении измерений внутри облака для слоев, прилегающих к верхней и нижней границам, подход, использованный для вывода аналитических формул, приводит к двум равнозначным вариантам (приводится для верхнего подслоя внутри облака).

$$s^2 = \frac{9\mu^2(\rho_0 - \rho)^2 - 4J^2 K_0^2(\mu)}{9\mu^2 \left\{ 16K_0^2(\mu_0)K_0^2(\mu) + (\rho_0 - \rho)^2 \left[ 2 \frac{K_2(\mu)}{K_0(\mu)} - \frac{a_2(\mu)a_2(\mu_0)}{4,28(\rho_0 - \rho)} - 4,59 - 9\mu^2 \left( \frac{J^2 - 4I_1^\downarrow I_1^\uparrow}{(I_1^\downarrow - I_1^\uparrow)^2} \right) \right] \right\}} \quad (1)$$

$$s^2 = \frac{9\mu^2(\rho_0 - \rho)^2 - 4J^2 K_0^2(\mu)}{9\mu^2 \left\{ 16K_0^2(\mu) \left[ K_0^2(\mu_0) - 0,25J^2 + I_1^\downarrow I_1^\uparrow \right] + (\rho_0 - \rho)^2 \left( 2 \frac{K_2(\mu)}{K_0(\mu)} - \frac{a_2(\mu_0)a_2(\mu)}{4,284(\rho_0 - \rho)} - 4,59 \right) \right\}} \quad (2)$$

Здесь:  $\mu$  – косинус зенитного (надирного) угла визирования;  $\mu_0$  – косинус зенитного угла Солнца;  $(\rho_0 - \rho)$  – разность коэффициента отражения полубесконечной атмосферы и интенсивности, измеренной над облаком в относительных единицах;  $I_1^\downarrow$  и  $I_1^\uparrow$  – интенсивности, измеренные на первом сверху уровне измерений внутри облака в углах визирования из нижней и верхней полусферы, соответственно. Также введено обозначение:  $J = (I_1^\downarrow - I_1^\uparrow)$ , а функции  $K_0$ ,  $K_2$  и  $a_2$  известны и зависят от геометрии задачи (углов Солнца и визирования).

Видно, что числители в формулах одинаковы и различие присутствует только в знаменателе. Можно заметить, что в формуле (1) приоритет при восстановлении величины  $s^2$  отдается измерениям над облаком, а в формуле (2) – измерениям на первом уровне внутри облака. При этом нет строгих критериев, какой же вариант формулы выбрать для обработки, кроме положительности получаемого результата.



*Рис. 4. Параметр подобия  $s^2$ , восстановленный из измерений внутри слоя, прилегающего к верхней границе, с использованием двух версий формулы (1) и (2) в спектральных каналах 340, 381, 470 и 682 нм*

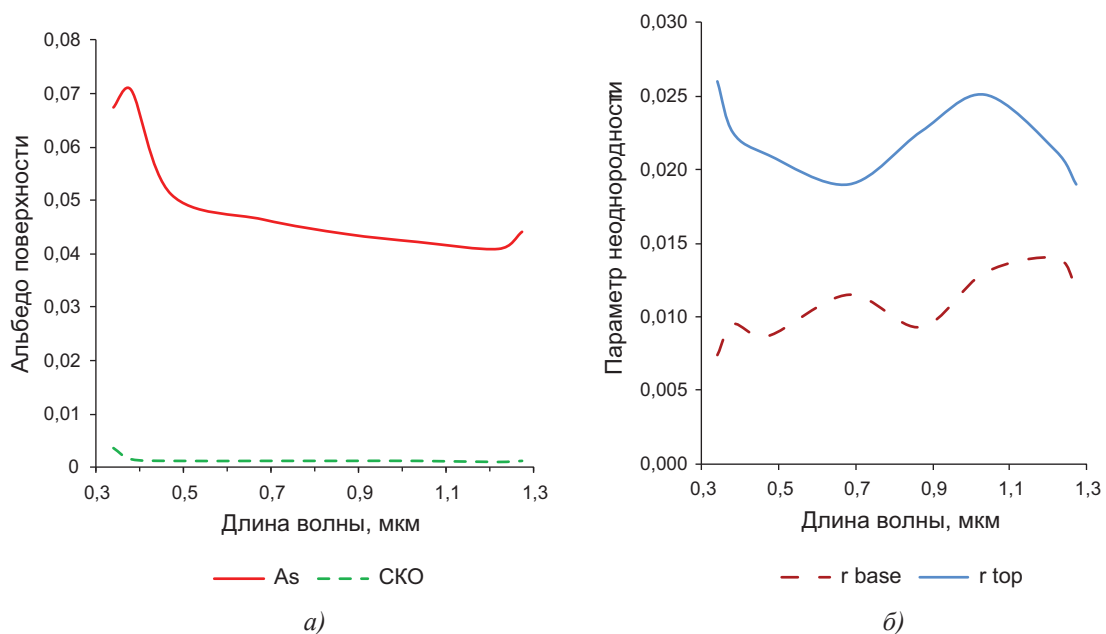
Однако применение обоих вариантов формулы к данным измерений дало неожиданный результат, и проблема выбора формулы для решения решилась просто: применение обоих вариантов формул привело к симметричной картине, представленной на рис. 4. При этом искомый параметр подобия  $s^2$  оказывается отрицательным (т.е. отсутствие непрерывности функции  $s$  и, следовательно, отсутствие решения) для некоторого набора углов визирования в одной версии формулы и положительным для того же набора углов в другой версии и наоборот для другого набора углов. Окончательно были выбраны положительные значения параметра  $s^2$  в обеих версиях формул для подслоев прилегающих к верхней и к нижней границе. Для подслоев вдали от границ формулы для параметра  $s^2$  получаются в единственном варианте.

### Учет альбедо подстилающей поверхности

Определение альбедо подстилающей поверхности  $A$  в случае измерения интенсивности непосредственно из данных измерений (как это делается в случае измерения полусферических потоков) невозможно, и следует говорить о восстановлении параметра.

Для этой процедуры был использован метод, предложенный ранее (Melnikova, Vasilyev, 2004). В этой работе было показано, что для однородных и ортотропных подстилающих поверхностей справедливо соотношение  $A = I(48^\circ) / I(132^\circ)$ , потому что для указанных углов визирования функция выхода, определяющая угловую зависимость радиации, равна единице.

Применение упомянутой формулы с последующим усреднением альбедо по всем сканам на уровне измерений под облаком (370 м), и оценка среднего квадратичного отклонения результата представлены на *рис. 5а*. Погрешность в определении альбедо вызвана, как случайными вариациями параметров полета самолета, так и отклонением подстилающей поверхности от идеальной ортотропной. Регуляризация результатов по 10 сканам с учетом СКО на каждом скане позволила получить результаты, хорошо совпадающие с величинами альбедо морской поверхности, рассчитанными непосредственно из измерений полусферических потоков (Varotsos et al., 2013).



*Рис. 5. а) Альбедо подстилающей поверхности и его среднее квадратичное отклонение и б) параметр неоднородности облака из измерений над (top) и под (base) облаком*

### 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  $K(\mu)$ ,  $K(\mu_0)$ ,  $a_2(\mu)$ ,  $a_2(\mu_0)$ ,  $\rho_0(\mu, \mu_0)$  (Melnikova, Vasilyev, 2004). Горизонтальная неоднородность всего облака приводит к вариациям пропущенной диффузной радиации, и соответствующий учет этого обстоятельства также можно сделать с применением предложенного подхода. Для определения параметра горизонтальной неоднородности верхней границы облака  $r$  вначале определяется оптическая толщина в предположении консервативного рассеяния по измерениям над облаком, а поправка на неоднородность всего облака – по измерениям под облаком.



Соответствующие процедуры включены в алгоритм обработки данных. Далее параметр неоднородности  $r$  вычисляется по формуле:

$$r = \frac{1}{N\bar{\tau}} \sqrt{\sum_{i=1}^N |\tau_i - \bar{\tau}|^2}, \quad (3)$$

где  $N$  – число направлений визирования;  $\tau_i$  – оптическая толщина получена в предположении консервативного рассеяния на первом этапе обработки из данных измерений в  $i$ -том направлении визирования;  $\bar{\tau}$  – среднее значение консервативной оптической толщины, полученное по всем направлениям визирования. Значение параметра  $r$ , восстановленное по измерениям над и под облаком, приведено на *рис. 5б*. После определения параметра  $r$  учитывается поправка на неоднородность облака при вычислении функций, зависящих от угла Солнца при рассмотрении измерений над облаком и угла визирования при рассмотрении измерений под облаком:

$$\begin{aligned} \hat{\rho}(\mu, \mu_0) &= \rho(\mu, \mu_0)(1-r) + ra(\mu), \\ \hat{K}(\mu_0) &= K(\mu_0)(1-r) + rn, \\ \hat{a}(\mu_0) &= a(\mu_0)(1-r) + ra^\infty. \end{aligned} \quad (4)$$

Разница в результате восстановления других искомым оптических параметров при учете и неучете неоднородности облака составляет около 2% при анализе пропущенной радиации (влияние неоднородности толщины всего облака) и 5% при анализе отраженной радиации (влияние неровности верхней границы облака).

Таблица 1. Параметр неоднородности облака  $r$

$\lambda, \text{нм}$		340	381	472	682	870	1035	1219	1273
$r$	Base	0,0074	0,0095	0,0087	0,0115	0,0093	0,0131	0,0138	0,0116
	Top	0,0260	0,0225	0,0210	0,0190	0,0226	0,0251	0,0230	0,0191

### Регуляризация решения

Напомним, что в эксперименте измеряются интенсивности рассеянной солнечной радиации в направлениях визирования через  $1^\circ$ , что дает возможность определять искомые параметры для большого количества углов визирования. Но простое усреднение полученных результатов не эффективно из-за случайных вариаций углов, определяющих полет самолета, которые 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. 1а* представлены СКО интенсивности, измеренной на высоте над облаком на высоте 799 м, под облаком на высоте 370 м и внутри облака на высоте 770 м в спектральных каналах 340, 682 и 1273 нм. Полученные погрешности во всех спектральных каналах и на всех уровнях измерений используются в процессе регуляризации результатов с учетом неравноточности процедур измерения и восстановления искомым параметров. При этом применяется формула (Васильев, Мельникова, 2009):



$$x = \sum_i x_i \frac{1}{(\Delta x_i)^2} / \sum_i \frac{1}{(\Delta x_i)^2}, \quad (5)$$

где  $x_i$  – искомый параметр для  $i$ -го значения угла визирования;  $\Delta x_i$  рассчитываются по формулам для косвенных погрешностей, получаемым на основе соответствующих формул для восстановления искомого параметра. На *рис. 2* показаны нерегуляризованные результаты оптической толщины и параметра  $s^2$  в зависимости от угла визирования. В данном примере регуляризация 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, соответствующие величины доли поглощенной радиации в слое оцениваются как 0,217 и 0,237. Разница составляет 12 и 9%, соответственно.

### Полученные результаты

Несмотря на то, что результаты обсуждались в других публикациях (Гения и др., 2013), кратко представим восстановленные значения оптических параметров и здесь для иллюстрации эффективности описанных процедур. Были восстановлены два оптических параметра (параметр подобия  $s^2$  и приведенная оптическая толщина  $\tau'$ ) для всего облака в целом из наблюдений над облаком (Top) на высоте 800 м и под облаком (Base) на высоте 370 м. Для регуляризации решения полученные значения искомых параметров для большого набора пар углов визирования усредняются по всем рассматриваемым парам с весом, равным обратной величине погрешности восстановления. В алгоритме оцениваются СКО полученных величин.

Полученные результаты представлены на *рис. 6* и в *табл. 2*. Значения, определенные из измерений над облаком помечены (Т), а из измерений под облаком – (В). На том же рисунке для сравнения показаны спектральные значения оптических параметров (Melnikova, Vasilyev, 2004), восстановленных из самолетных измерений полусферических потоков солнечной радиации в облаках (Kondratyev et al., 1976). Места и даты экспериментов указаны на рисунке. Обсуждение результатов выходит за рамки данной статьи и приводится в других публикациях (Гения и др., 2013). Здесь только отметим приемлемое согласие величин и спектральных зависимостей оптических параметров протяженных облаков, полученных в результате решения обратной задачи на основе различных самолетных радиационных измерений.

При обработке измерений внутри облака были использованы соответствующие аналитические формулы, полученные ранее (Melnikova, Mikhailov, 2001). Напомним, что поле рассеянной радиации различно у верхней и нижней границ облака и внутри него, поэтому было получено три комплекта формул для подслоя, прилежащего к верхней границе, к нижней границе и удаленных от границ. На *рис. 7* представлены вертикальные профили альбедо однократного рассеяния и оптической толщины между уровнями измерений для УФ (340 нм) и БИК (870 нм) спектральных каналов, полученные из анализа данных внутри облака. Регуляризованные на каждом уровне результаты дополнительно сглажены по высоте с учетом среднего СКО восстановления параметра и измерений на данном уровне.

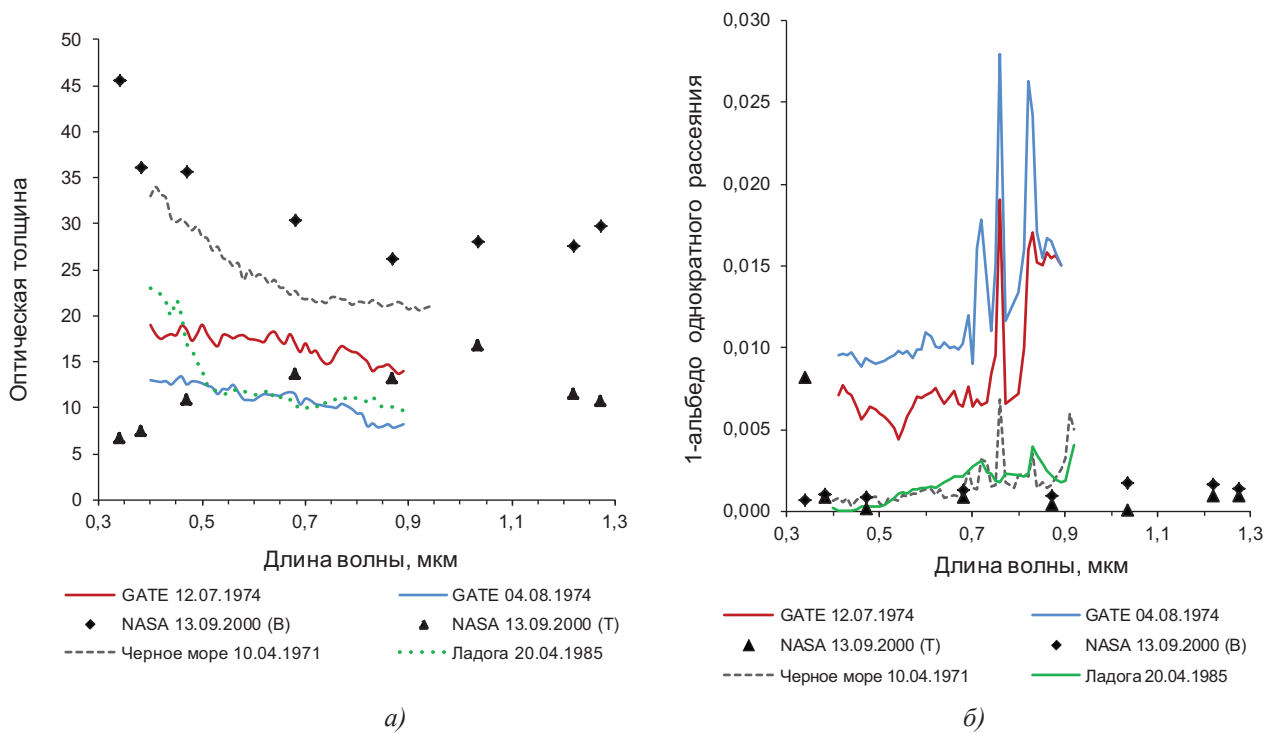
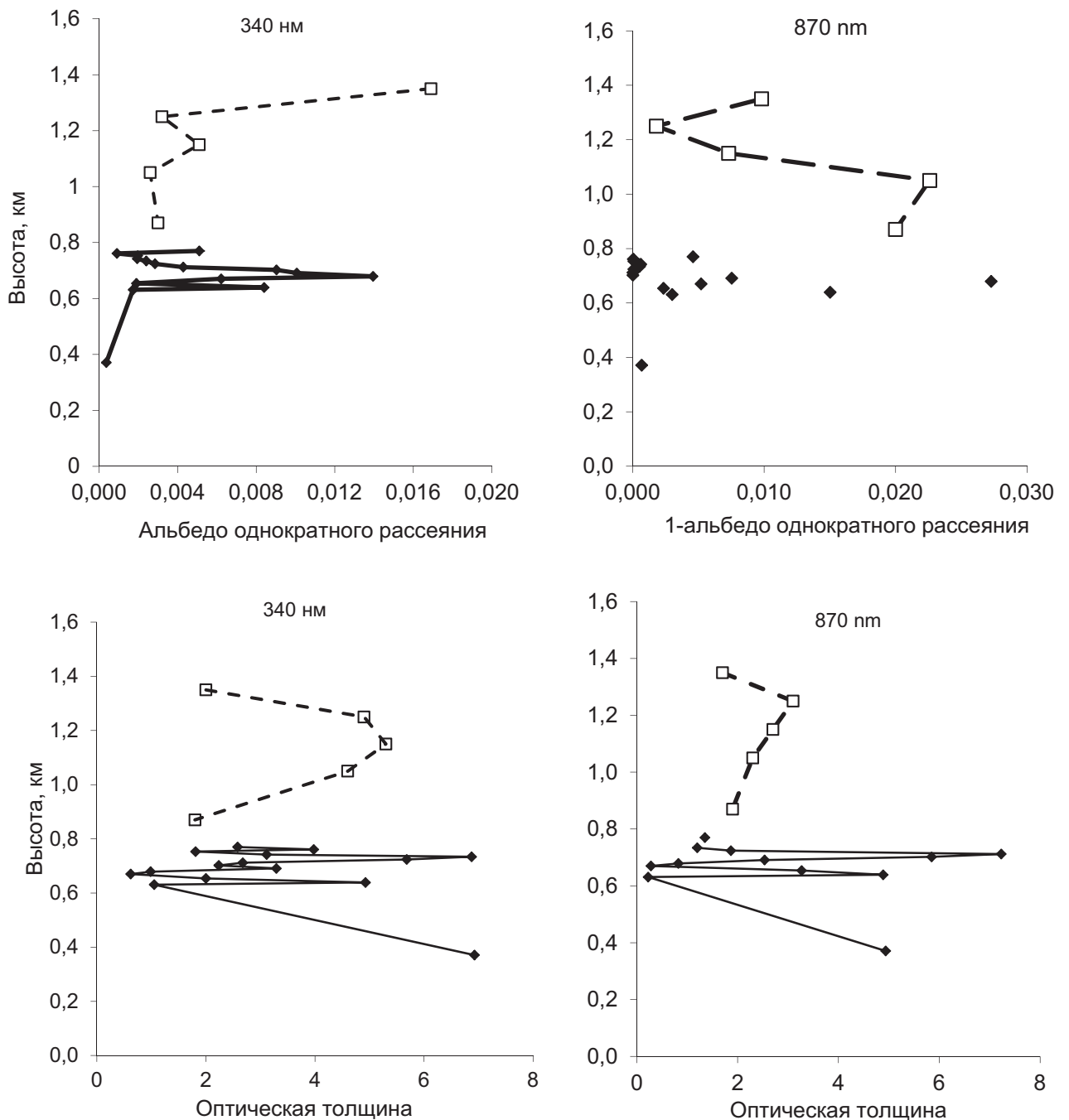


Рис. 6. Оптические параметры (а – оптической толщины, б – параметра 1-альbedo однократного рассеяния), восстановленные из самолетных измерений интенсивности (ромбы – под облаком, треугольники – над облаком) и измерений полусферических потоков рассеянной солнечной радиации над различными водными поверхностями. Места и даты измерений указаны на рисунках

Тем не менее, резкие колебания результатов по высоте типичны для обратной задачи и свидетельствуют о значительных погрешностях исходных данных и метода решения. Эти погрешности вызваны слишком близким к верхней границе расположением уровней измерений, где еще не установлен диффузный режим.

Таблица 2. Результаты определения оптических параметров облака из самолетных радиационных наблюдений над и под облаком

$\lambda, \text{нм}$	340	381	472	682	870	1035	1219	1273	
$A$	0,0662	0,0673	0,0505	0,0458	0,0430	0,0417	0,0403	0,0435	
СКО $A$	0,0036	0,015	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0010	0,0012	
$T$	Base	45,2	36,1	35,6	30,4	26,2	28,1	27,6	29,0
	Top	8,7	8,3	11,5	13,5	13,3	17,3	12,5	11,4
СКО $T$	0,7986	0,7249	0,7260	0,6826	0,6748	0,6668	0,6697	0,6638	
$\Omega_0$	Base	0,999307	0,99896	0,99917	0,99871	0,99904	0,99831	0,99831	0,99859
	Top	0,98576	0,99736	0,99735	0,99932	0,99934	0,99895	0,99854	0,99885
СКО $\Omega$	0,00037	0,00032	0,00026	0,00024	0,00018	0,00022	0,00025	0,00026	



*Рис. 7. Вертикальный профиль оптических параметров (оптической толщины между уровнями измерения внутри облака и параметра 1-альbedo однократного рассеяния для двух спектральных каналов) восстановленных из самолетных измерений интенсивности (NASA 13.09.2000, сплошные линии) и измерений потоков (Ладога 20.04.1985, пунктирные линии) рассеянной солнечной радиации в облаке*

Несмотря на эти неблагоприятные обстоятельства, получены разумные значения оптических параметров внутри облака, что указывает на принципиальную возможность использования асимптотического метода для обработки измерений такого рода. На том же рисунке приведены для сравнения вертикальные профили оптических параметров (Melnikova, Mikhailov, 2001), полученные из измерений полусферических потоков над Ладожским озером (Melnikova, Vasilyev, 2004).

## Заключение

Рассматриваемый радиационный эксперимент послужил основой для создания и отладки детального алгоритма обработки данных аналогичных измерений. Следует отметить, что измерения интенсивности значительно сильнее подвержены влиянию случайных вариаций ориентации самолета, чем измерения полусферических потоков. Однако, регистрация по несколько сканов на каждой высоте (до 10 сканов) позволяет оценить возникающую при этом случайную погрешность, а большое количество направлений визирования позволяет осуществить регуляризацию 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 численными методами решения обратной задачи.

Результаты, полученные при применении аналитического метода решения обратной задачи к данным измерений NASA, хорошо согласуются с результатами, полученными ранее при применении асимптотического метода к обработке данных спектральных измерений полусферических потоков в облаке другим прибором.

## Литература

1. *Васильев А.В., Мельникова И.Н.* Методы прикладного анализа результатов натурных измерений в окружающей среде: Учебное пособие. СПб: аИзд-во БГТУ «Военмех». 2009. 370 с.
2. *Васильев А.В., Мельникова И.Н.* Экспериментальные модели атмосферы и земной поверхности: Учебное пособие. СПб: Изд-во БГТУ «Военмех». 2010. 226 с.
3. *Гения М.Д., Кузнецов А.Д., Мельникова И.Н., Гатебе Ч.* Восстановление оптических параметров облаков из самолетных измерений. Погрешности и регуляризация решения // Оптика атмосферы и океана (в печати).
4. *Гения М.Д., Кузнецов А.Д., Мельникова И.Н., Гатебе Ч.* Результаты обработки самолетных измерений интенсивности рассеянной солнечной радиации в облачной атмосфере // Ученые записки РГГМУ. 2013. № 27. С. 77–93.
5. *Мельникова И.Н., Никитин С.А., Гатебе Ч.* Алгоритм восстановления оптических параметров протяженной облачности из самолетных, спектральных измерений интенсивности солнечной радиации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сб. ИКИ РАН. 2009. С. 176–186.
6. *Gatebe C.K., Butler 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. 2007. V. 46. No. 31. P. 7640–7651.
7. *Gatebe C.K., King M.D., Platnick S., Arnold T., Vermote E.F., Schmid B.* Airborne spectral measurements of surface-atmosphere anisotropy for several surfaces and ecosystems over southern Africa // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. D13.

8. *King M.D.* Determination of the scaled optical thickness of cloud from reflected solar radiation measurements // *J. Atmos. Sci.* 1987. V. 44. P. 1734–1751.
9. *King M.D., 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.* 1990. V. 47. P. 894–907.
10. *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.
11. *Melnikova I., Vasilyev A.* Short-wave solar radiation in the Earth atmosphere. Calculation. Observation. Interpretation. Springer-Verlag GmbH&Co.KG. Heidelberg. 2004. 320 p.
12. *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.* 2000. V. 57. No. 6. P. 2135–2143.
13. *Melnikova I.N., Mikhailov V.V.* Vertical profile of spectral optical parameters of strati clouds from airborne radiative measurements // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. No. D21. P. 27465–27471.
14. *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.* 2004. V. 109. D05202. P. 27235–27241.
15. *Stephens G.L.* Optical properties of eight water cloud types // *Technical Paper of CSIRO. Atmos. Phys. Division Aspendale. Australia.* 1979. V. 36. P. 1–35.
16. *Varotsos C.A., Melnikova I.N., Cracknell A.P., Tzanis C., Vasilyev A.V.* New spectral functions of the near-ground albedo derived from aircraft diffraction spectrometer observations // *Atmospheric Chemistry and Physics.* 2013. V. 13. P. 16211–16245.

### **Considering uncertainties and regularizing the solution of the inverse problem of cloud optics in shortwave spectral ranges**

**M.J. Genya, A.D. Kuznetsov, I.N. Melnikova**

*Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia*

*E-mail: melnikova.irina@pobox.spbu.ru*

Results of the inverse problem solution on the base of airborne radiative observation (NASA, USA and SPbSU, Russia) are considered. The algorithm and first results of processing have been presented earlier (Melnikova et al., 2009, Genya et al. 2013). Here observational and processing uncertainties are taken into account for result regularization. The influence of uncertainties of observation, angle function calculation, and processing approach are analyzed. The dependence on viewing direction is appeared. Calculating uncertainties is accomplished analytically with using formulas for optical parameters retrieval. Retrieval results obtained from USA and old Russian data are compared.

**Keywords:** solar radiation, intensity, radiation field, inverse problem, cloud optical parameters.