

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Российский государственный гидрометеорологический университет»  
(РГГМУ)

На правах рукописи  
УДК [551.521.1]

Гения Мванго Джефва

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО РЕЖИМА ОБЛАЧНОЙ  
АТМОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ МНОГОУГЛОВЫХ  
ИЗМЕРЕНИЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ**

Специальность 25.00.30 – метеорология, климатология и агрометеорология

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет».

**Научный руководитель:**

Доктор физико-математических наук  
Мельникова Ирина Николаевна

**Официальные оппоненты:**

Доктор физико-математических наук  
Васильев Александр Владимирович

Доктор физико-математических наук  
Синькевич Андрей Александрович

**Ведущая организация:**

Международный Центр по Окружающей Среде и Дистанционному Зондированию им. Нансена (г. С.-Петербург)

Защита диссертации состоится 27 декабря 2012 года в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного Совета Д.212.197.01 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: **195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, д. 98.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета

Автореферат разослан 26 ноября 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.197.01

доктор географических наук, профессор



А.И. Угрюмов

## **Актуальность темы**

Ухудшение экологической ситуации во многих регионах земного шара и на планете в целом требует исследований взаимодействия солнечной радиации, облачности и атмосферных аэрозолей, основанных на экспериментальных данных. Известно, что динамика облачного покрова и облачно-радиационные обратные связи играют главную климатообразующую роль в атмосфере земли. Глобальное потепление, связываемое с изменением температуры и обусловленное парниковым эффектом, будет сопровождаться усилением осадков в одних регионах и опустыниванием территорий в других. Выявлена корреляция спада осадков в субсахарской зоне с начала 60-х годов (т.е. в период засухи) с аномалиями температуры поверхности Индийского и Атлантического океанов в этот период. Взаимодействие между облачностью и безоблачной атмосферой является важнейшим фактором определяющим влагосодержание безоблачной атмосферы и интенсивность осадков. Уменьшение количества осадков вызывает опустынивание земель, что относится к крупным экологическим катастрофам. В частности к такому явлению можно отнести деградацию экосистемы в Сахели (Африка). Дистанционные методы восстановления оптических характеристик облачности способствуют определению влагосодержания облаков и построению прогнозов выпадения осадков в засушливых зонах. Понятно, что большие неопределенности численного моделирования связаны с неадекватным учетом взаимодействия атмосферы и океана, динамики облачного покрова, взаимодействия облачности и радиации. Адекватные реальной природе модели требуют экспериментальной проверки и осуществления полевых экспериментов. Результаты одного такого самолетного эксперимента анализируются в данной работе.

## **Цели работы**

- Восстановление оптических параметров облачного слоя из самолетных измерений интенсивности рассеянной солнечной радиации прибором CAR в

NASA, Goddard Space Flight Center с применением аналитического метода решения обратной задачи.

- Расчет лучистого коротковолнового притока тепла в слое облачной атмосферы, оценка скорости нагревания облачного слоя за счет коротковолновой солнечной радиации и водозапаса облака для прогнозирования вероятности выпадения осадков на основе оптической модели, полученной при решении обратной задачи.

### **Основные задачи исследования:**

- Вывод новых аналитических формул и уточнение имеющихся формул решающих обратную задачу оптики облаков для разной геометрии измерений (над облаком, под облаком, внутри облака на разных уровнях),
- Разработка алгоритма обработки экспериментальных данных, составление компьютерных программ для обработки данных, выбор метода регуляризации решения, и его реализация в программных кодах, анализ полученных результатов,
- Расчет лучистого коротковолнового притока тепла, скорости нагревания и водозапаса облака на основе полученных в работе оптических параметров.

### **Методы исследования**

базируются на асимптотических формулах теории переноса радиации, методах решения обратных задач и теории рассеяния.

### **Научная новизна работы.**

- Получен ряд новых аналитических формул для решения обратной задачи оптики облаков из данных измерений рассеянной интенсивности солнечной радиации.
- Предложен новый алгоритм обработки экспериментальных данных для определения оптических параметров облака при различной геометрии измерений.

- Впервые получены сразу два параметра облака: альbedo однократного рассеяния и оптическая толщина из данных самолетных измерений интенсивности солнечной радиации в облачной атмосфере для каждого спектрального канала независимо и без привлечения дополнительных ограничивающих допущений. Именно поэтому использованный метод дает значительное преимущество перед многими применяемыми ранее подходами к решению обратной задачи оптики облаков.
- Впервые проведена оценка лучистого притока коротковолновой радиации в слое облаков, скорости нагревания и водозапаса облака из измерений подобного рода.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Ряд новых аналитических формул для решения обратной задачи оптики облаков для обработки данных измерений над облаком, под облаком, внутри облака на разных уровнях
2. Алгоритм обработки экспериментальных данных,
3. Компьютерные программы для обработки данных,
4. Метод регуляризации решения, и его реализация в программных кодах,
5. Значения оптических параметров протяженного слоистого облака в 8-ми спектральных каналах, полученные из данных измерений над облаком, под облаком и на 11 уровнях внутри облака
6. Значения лучистого коротковолнового притока тепла, скорости нагревания и водозапаса облака, рассчитанные на основе оптической модели, полученной из решения обратной задачи оптики облаков.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов базируется на применении математически строгой теории переноса излучения, теории рассеяния света, и теории обратных задач правомочность которых доказана многолетним их применением, и сравнением полученных результатов с результатами других авторов и измерений.

**Практическая значимость работы** определяется необходимостью знания оптических параметров облачности, полученных из экспериментальных данных, для выяснения вопроса взаимодействия солнечной радиации – атмосферного аэрозоля – облачности; для расчета коротковолнового радиационного баланса облачной атмосферы; для построения оптических и радиационных моделей атмосферы в численных моделях климата; для оценки водозапаса облаков и прогноза количества осадков.

### **Личный вклад автора**

Автором выведен ряд новых формул, решающих обратную задачу оптики облаков. Построен алгоритм обработки экспериментальных данных. Созданы компьютерные программы для обработки данных. Проведен анализ полученных результатов. Выполнена регуляризация решения задачи и получена оценка величины ряда важных метеорологических параметров.

### **Апробация работы.**

Результаты исследований были доложены на международных и российских конференциях:

- 4-ый межрегиональный научный семинар «ЭКОЛОГИЯ И КОСМОС». Памяти Академика К.Я. Кондратьева. НИИ Физики им. В.А. Фока, Санкт-Петербург, Петродворец, 08 февраля 2010
- 5-ый межрегиональный научный семинар «ЭКОЛОГИЯ И КОСМОС», Санкт-Петербург, 09 февраля 2012.
- Восьмая Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов) Москва, ИКИ РАН, 15 - 19 ноября 2010
- 13th Conference on Atmospheric Radiation. Portland, Oregon. 28 June-2 July 2010.
- Конференция РГГМУ. Санкт-Петербург. Февраль 2011

- Девятая открытая Всероссийская конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", Москва, ИКИ РАН, 14-18 ноября 2011
- 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment. The GEOSS Era: Towards Operational Environmental Monitoring. Sydney, Australia, 10-15 April 2011
- The International Radiation Symposium (IRS) 2012, Berlin, Germany, 06–10 August 2012
- Восьмая международная конференция Естественные и антропогенные аэрозоли. 1-5 октября 2012 г. Санкт-Петербург.
- Десятая открытая Всероссийская конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", Москва, ИКИ РАН, 12-16 ноября 2012

**Публикации.** Основные результаты, обобщенные и систематизированные в работе опубликованы или представлены для публикации в печатных изданиях:

- Сборник статей по материалам 4-ого межрегионального научного семинара «Экология и космос» Санкт-Петербург. НИХИ СПбГУ. 2010, 2012;
- Сборники ИКИ РАН «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, Москва. 2010, 2012.
- Proceedings of 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment. The GEOSS Era: Towards Operational Environmental Monitoring. Sydney. Australia. 10-15 April 2011
- Журнал СО РАН Оптика атмосферы и океана, 2013
- Журнал Известия РАН, серия Физика атмосферы и океана, 2013
- Ученые записки РГГМУ, 2012
- Proceedings. The International Radiation Symposium (IRS) 2012, Berlin, Germany, 06–10 August 2012

## **Структура и объем работы.**

Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, 2 приложений и списка литературы – 110 наименований, 12 таблиц и 15 рисунков.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** на основе анализа современного состояния проблемы вариаций климата, повышения средней глобальной температуры, изменения осадков в засушливых зонах показана важность и актуальность заявленных в работе целей. Сформулированы основные задачи исследования, аргументирована обоснованность и достоверность полученных результатов.

**В первой главе** осуществляется физическая и математическая постановка задачи взаимодействия атмосферных аэрозолей, облачности и солнечной радиации на основе строгой теории переноса излучения и теории рассеяния. Введены и описаны основные понятия и характеристики указанного взаимодействия и рассмотрены особенности прямой задачи оптики облаков – диффузное приближение и асимптотические формулы теории переноса. Рассмотрен случай слабого истинного поглощения в среде и приведены соответствующие разложения асимптотических величин и функций по малому параметру. Представлены сведения о точности асимптотического метода. На основе анализа имеющейся информации о свойствах слоистой облачности показано, что для реальные слоистые облака достаточно протяженные и долгоживущие образования и применение рассмотренных подходов вполне правомерно для получения достоверных результатов.

**Во второй главе** описан прибор CAR с помощью которого проводились измерения. Представлен процесс его калибровки, проведен анализ погрешностей измерений и описаны условия проведения самолетного эксперимента, результаты которого рассматриваются в работе.

**В третьей главе** приведены основные сведения о математическом аспекте решения обратных задач, перечислены подходы и методы определения



оптических параметров облачности других авторов и показано, что применяемое в данной работе аналитическое решение обратной задачи оптики облаков имеет ряд преимуществ, а именно: возможность определять сразу два оптических параметра (оптическую толщину и альбедо однократного рассеяния или объемные коэффициенты рассеяния и поглощения) для каждой длины волны или спектрального канала независимо, отсутствие ряда ограничивающих предположений (о консервативности рассеяния света в облаках, о полубесконечности оптической толщины облачного слоя) и ограничивающих связей между параметрами (равенство оптической толщины в разных спектральных каналах). Представлен аналитический аппарат, частично полученный автором, который служит основой для решения поставленной задачи. В частности, формулы для определения параметра подобия  $s^2 = (1 - \omega_0) / [3(1 - g)]$ , где  $\omega_0$  – альбедо однократного рассеяния и  $g$  – параметр асимметрии индикатрисы рассеяния имеют вид:

- для обработки данных измерений отраженной радиации над облачным слоем

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

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  измеряемые интенсивности отраженной радиации в двух углах визирования  $\arccos \mu_1$  и  $\arccos \mu_2$  и  $\rho_\infty(\mu_2, \mu_0, \varphi)$  – коэффициент отражения полубесконечной консервативной атмосферы ( $\tau_0 = \infty$ ,  $\omega_0 = 1$ ),  $q' = 0,714$ ;  $K(\mu)$ ,  $K_0(\mu)$  и  $K_2(\mu)$  – функция выхода и коэффициенты ее разложения по малому параметру  $s$ ;  $a_2(\mu)$  – это второй коэффициент в разложении функции плоское альбедо. Вид этих функций известен и значения для заданных углов солнца и визирования можно найти в таблицах или рассчитать по аппроксимационным формулам.

- для обработки данных измерений пропущенной радиации под облачным слоем

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

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  измеряемые интенсивности пропущенной радиации в двух углах визирования  $\arccos \mu_1$   $\arccos \mu_2$

- для совместной обработки данных измерений отраженной и пропущенной радиации над и под облачным слоем

$$s^2 = \frac{\bar{K}_0(\mu)^2 (\rho_0 - \rho)^2 - K_0(\mu)^2 \sigma^2}{\bar{K}_0(\mu)^2 \left[ 16K_0^2(\mu)K_0^2(\mu_0)s^2 - \frac{a_2(\mu)a_2(\mu_0)}{6q'} (\rho_0 - \rho) + (\rho_0 - \rho)^2 \left( 2 \frac{K_2(\mu)}{K_0(\mu)} - 9q'^2 \right) \right] - G}, \quad (3)$$

$$G = \sigma^2 K_0^2(\mu) \left[ 27\bar{q}'^2 + \frac{2}{\bar{K}_0(\mu)} \left[ \frac{A}{1-A} \left( 12\bar{K}_0(\mu)\bar{q}' + 12q' \frac{A}{1-A} + a_2(\mu) + n_2 \right) + \bar{K}_2(\mu) \right] \right]$$

Формулы для определения оптических параметров из измерений внутри облака следующие:

Для подслоя, примыкающего к верхней границе облака, обозначая  $J_1 = I_1^\downarrow - I_1^\uparrow$ :

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

Для внутренних подслоев облака, обозначая  $J_i = I_i^\downarrow - I_i^\uparrow$ , имеем:

$$s^2 = \frac{(J^2(\tau_i) - J^2(\tau_{i-1}))J^2(\tau_i)J^2(\tau_{i-1})}{36\mu^2 [J^2(\tau_{i-1})I(\mu, \tau_i)I(-\mu, \tau_i) - J^2(\tau_i)I(\mu, \tau_{i-1})I(-\mu, \tau_{i-1})]} \quad (5)$$

Для нижнего подслоя, примыкающего к нижней границе облака:

$$s^2 = \frac{1 - 4\bar{K}_0^2(\mu)J_{n-1}^2/9\mu^2\sigma^2}{27q'^2 + \frac{2}{\bar{K}_0(\mu)} \left[ \frac{A}{1-A} \left( a_2(\mu) + n_2 + 12 \left( \bar{K}_0(\mu)\bar{q}' + \frac{q'A}{1-A} \right) \right) + K_2(\mu) \right] - J_{n-1}^2 (I_{n-1}^\downarrow + I_{n-1}^\uparrow)^2 / \sigma^2} \quad (6)$$

Формулы для определения оптической толщины здесь не приводим, они также даны в диссертации. Аналитическое представление решения обратной задачи позволяет получить формулы для погрешностей, вызванных процедурой обработки данных, которые служат для регуляризации окончательных результатов в алгоритме программы обработки. Анализ погрешностей метода восстановления, регуляризация полученного решения и учет горизонтальной неоднородности облака подробно описаны в тексте диссертации.

**В четвертой главе** представлены полученные результаты восстановления оптических параметров облака из всех имеющихся в эксперименте наблюдательных данных. Подробно описан алгоритм обработки экспериментальных данных для каждого случая: наблюдений над облаком, под облаком, совместной обработки и наблюдений внутри облака на каждом уровне. Результаты для случаев обработки наблюдений над, под облаком и совместной обработки приведены в Таблице 1.

На рисунке 1 представлены вертикальные профили оптической толщины и альбедо однократного рассеяния для 2-х спектральных каналов 340 и 870 нм, полученные из анализа данных внутри облака. Надо иметь в виду, что погрешности этих результатов значительны потому, что измерения проводились близко к верхней границе облака. Геометрическая толщина нижнего подслоя облаков 130 м, все верхние подслои толщиной около 10 м. Резкие вариации оптических параметров с высотой коррелируют для разных спектральных каналов, поэтому можно сделать вывод, что полученные результаты отражают реальную вертикальную неоднородность облачного слоя.

Процедура сглаживания с учетом вариаций, повторяющихся в разных спектральных каналах, поможет получить более надежные значения.

Таблица 1 – Результаты определения оптических параметров облака из самолетных радиационных наблюдений.

$\lambda$ , МКМ		0,340	0,381	0,472	0,682	0,870	1,035	1,219	1,273
$\tau_{Conserv}$	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
$\tau$	Base	41,9	33,9	29,6	25,4	26,7	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 $\tau$		0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
$\sigma$ км <sup>-1</sup>	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
$\omega$	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
$1-\omega$	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
$\kappa$ , км <sup>-1</sup>	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 $\omega$		0,0008	0,009	0,004	0,004	0,004	0,004	0,024	0,006

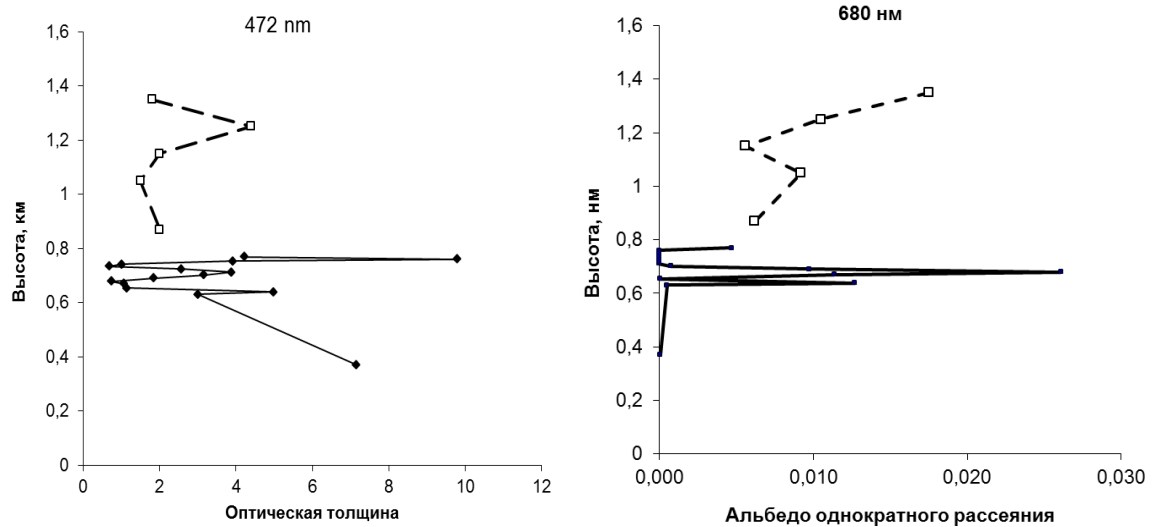


Рисунок 1 – Вертикальные профили а) оптической толщины в канале 472 нм и б) 1-альбеда однократного рассеяния между уровнями измерений в канале 680 нм, восстановленные из измерений NASA в 2000 г. (сплошные линии) и из измерений над Ладогой в 1985 г. (штриховые линии)

Для сравнения с полученными значениями оптических параметров рассмотрены результаты восстановления параметров облачных слоев полученные из самолетных радиационных измерений полусферических потоков солнечной радиации, выполненных в Ленинградском (Санкт-Петербургском) государственном университете в 1974 г. над Атлантическим

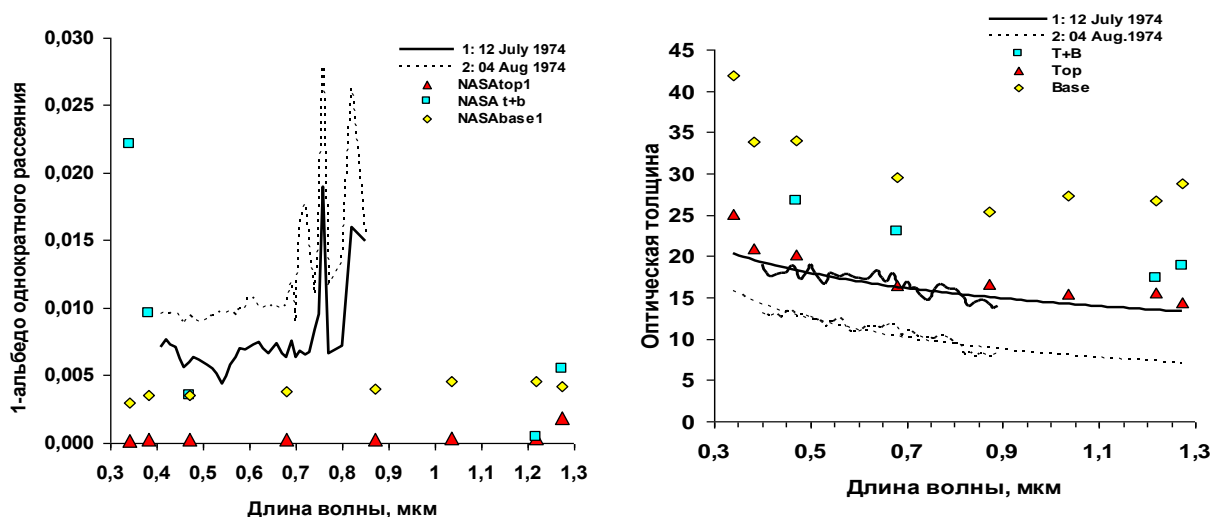


Рисунок 2 – Сравнение спектральных значений оптических параметров полученных из различных самолетных измерений

океаном у северо-западных берегов Африки в эксперименте ТРОПЭКС и в 1985 г. над Ладожским озером. В самолетных экспериментах применялся спектрометр, сконструированный и калиброванный специально для измерений солнечной радиации в атмосфере в диапазоне спектра 0,35–0,95 мкм со спектральным разрешением 0,002 мкм.

Измерения выполнялись в двух полетах в рамках международного эксперимента АТЭП (GATE) у берегов Северо-Западной Африки на широте 16 и 17° с.ш. 12.07.1974 (толщина облачного слоя 0,90 км) и 04.08.1974 (толщина облачного слоя 0,30) над и под облачным слоем после выноса песка из Сахары. Альbedo поверхности рассчитывалось по измеренным в экспериментах значениям отраженного и падающего потоков радиации на нижнем уровне полетов.

На рисунке 2 показаны спектральные зависимости оптической толщины и ко-альbedo однократного рассеяния, полученные из российских самолетных спектральных измерений, и результаты полученные в данной работе из наблюдений НАСА. Ромбами отмечены результаты, полученные из измерений под облаком, треугольниками – из измерений над облаком, и квадратами – из совместной обработки измерений над и под облаком.

Следует отметить, что все результаты настоящего исследования хорошо согласуются с величинами, полученными ранее. Таким образом, близкие значения альbedo однократного рассеяния и оптической толщины, а также ее спектральная зависимость выявлены в разных самолетных экспериментах, различающихся временем (1974 и 2000 гг), местом (Северо-запад и Юго-запад Африки), приборами (спектрометр и многоканальный радиометр) и измеряемой характеристикой (полусферические потоки и интенсивности).

Результаты обработки измерений отраженной интенсивности радиации над облаком демонстрируют значительно более слабое поглощение и меньшую оптическую толщину, чем при обработке пропущенной радиации под слоем облака. Этому обстоятельству может служить то, что в верхней части облака

меньше поглощающих радиацию аэрозолей и меньше коэффициенты рассеяния и поглощения. Подобная картина получается и в результате анализа измерений внутри облака на рисунке 1.

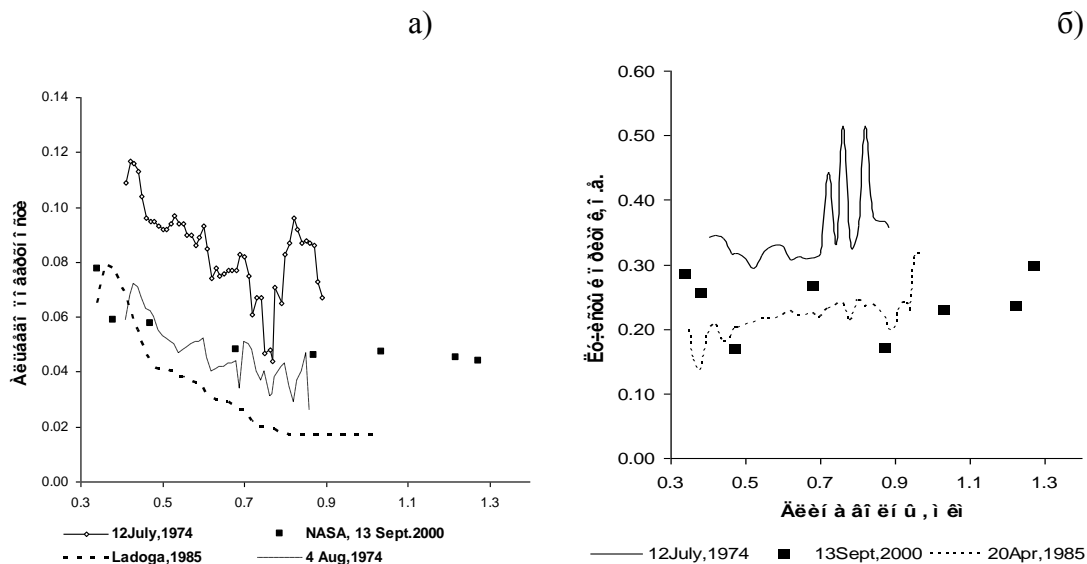


Рисунок 3 – а) Спектральная зависимость альбедо водной поверхности: Атлантический океан 1974 г. и 2000 г. и Ладожское озеро 1985 г.

б) Лучистый приток коротковолновой солнечной радиации в слое 1 км в относительных единицах от падающего солнечного потока

Альбедо поверхности представлено на рисунке 3а вместе результатами, полученными в эксперименте по программе GATE-1974 и измерениями над Ладожским озером в 1985 г. 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 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 альбедо на нижнем уровне измерения характеризует альбедо системы поверхность-подоблачный слой атмосферы. Нижний уровень измерений в 1985 г. находился на 100 м, поэтому подоблачная атмосфера влияет значительно слабее и не увеличивает альбедо поверхности. Высокое содержание пылевого аэрозоля спровоцировало сильное рассеяния 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.

Расчет величины поглощения радиации (лучистого притока) в облачном слое проведен по известной формуле  $dR(\mu_0) = [(F^\downarrow - F^\uparrow)_{\text{top}} - (F^\downarrow - F^\uparrow)_{\text{base}}]/\Delta z$ , где  $F^\downarrow$  и  $F^\uparrow$  полусферические нисходящий и восходящий потоки на верхней и нижней границе облака соответственно. Соответствующие результаты представлены на рисунке 3б сплошной и пунктирной линиями. В случае наблюдений НАСА лучистый приток рассчитан методом Эддингтона на основе полученных оптических параметров облака и обозначен черными квадратами.

Скорость нагревания атмосферного слоя содержащего облачный слой в коротковолновом спектральном диапазоне можно оценить как

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_p = \frac{S_\lambda}{rC_p} \frac{dR}{dz} \quad (7)$$

где,

$dR/dz$  – лучистый приток тепла в слое 1 км, здесь составляет  $0,2 \cdot 10^{-3}$ ;

$\partial T$  – изменение температуры в течение дня;

$S_\lambda = 1000$  Дж/(с м<sup>2</sup>) – солнечная постоянная в коротковолновом спектральном диапазоне (0,3 – 1,0 мкм);

$r = 1$  кг/м<sup>3</sup> – плотность воздуха на уровне 800 мб;

$C_p = 1005$  Дж/(кг град) – удельная теплоемкость сухого воздуха,  $C_p = 1952$  Дж/(кг град) – удельная теплоемкость водяного пара при постоянном давлении; 4218 Дж/(кг град) – удельная теплоемкость жидкой воды при температуре 0°C; для расчетов принято среднее значение  $C_p = 2392$  Дж/(кг град).



Приближенная оценка скорости нагревания атмосферного слоя толщиной 400 м с облаками за счет коротковолновой солнечной радиации в течение дня (12 часов – светлое время) дает  $\Delta T \sim 3,61$  град/сутки.

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

$$W = \frac{Q10^3}{\Delta z} = \frac{\tau r \rho}{1,5\Delta z} \quad (8)$$

где  $W$  – водность облака ( $\text{г/м}^3$ ),  $Q$  – водозапас ( $\text{кг/м}^2$ ),  $\Delta z$  – геометрическая толщина облака,  $r$  – средний эффективный радиус капли,  $\rho$  – 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 ( $^{\circ}\text{C}$ ) и от высоты над нижней границей (км), и его можно оценить по аппроксимирующей формуле

$$r = 5(1 + 4,8 \cdot 10^{-2} \theta + 2 \cdot 10^{-2} \theta^2)(1 + 0,165 z + 0,105 z^2) \quad (9)$$

Принимая температуру нижней границы облака  $15^{\circ}\text{C}$ , 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  $1 \text{ г/см}^3$ , имеем для водности  $W = 0,375 \text{ г/м}^3$ , а для водозапаса облака  $Q = 0,15 \text{ кг/м}^2$ . Оценки по формуле, приведенной в справочнике «Облака и облачная атмосфера»

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

дают соответственно значения:  $W = 0,358 \text{ г/м}^3$  и  $Q = 0,143 \text{ кг/м}^2$ , что хорошо согласуется с полученным результатом.

**В заключении** сформулированы основные выводы и результаты работы. Рассматриваемые данные самолетных наблюдений представляют собой богатый материал и позволяют всесторонний анализ облака с точки зрения строгой теории переноса излучения. Рассматриваемый эксперимент послужил основой для создания детального алгоритма обработки аналогичных данных. Выполненные исследования позволили сделать следующие основные выводы:

1. Измерения интенсивности сильнее подвержены влиянию случайных вариаций ориентации самолета, чем измерения полусферических потоков, что значительно сказывается на результатах восстановления искомых параметров. Однако, регистрация по несколько сканов на каждой высоте позволяет оценить случайную погрешность, а большое количество направлений визирования позволяет провести регуляризацию результатов.
2. Погрешность восстановления оптических параметров из данных самолетных радиационных измерений 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 численными методами решения обратной задачи. 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.
3. Результаты, полученные при применении аналитического метода решения обратной задачи к данным измерений интенсивности рассеянной солнечной радиации в NASA, хорошо согласуются с результатами, полученными ранее из данных спектральных измерений полусферических потоков в облаке

другим прибором, выявляют аналогичную спектральную зависимость оптической толщины и близкие значения альбедо однократного рассеяния.

4. Расчет лучистого коротковолнового притока тепла и скорости нагревания показывает значительное влияние облака на термический режим атмосферы. Оценка влагозапаса и облака хорошо согласуется с данными других исследований и может оказаться полезной для возможности предсказывать вероятность выпадения осадков (в данном случае над засушливыми районами Африки).

### **Публикации по теме диссертации по теме диссертации**

Издания, рекомендованные ВАК выделены жирным шрифтом.

1. Гения Мванго Джефва. Метод и алгоритм обработки данных самолетных наблюдений НАСА. 4-ый межрегиональный научный семинар «ЭКОЛОГИЯ И КОСМОС». Памяти Академика К.Я. Кондратьева. НИИ Физики им. В.А. Фока, Санкт-Петербург, Петродворец, 08.02.2010
2. Джефва М.Г., Мельникова И.Н., Гатебе Ч. Определение оптических параметров облачной атмосферы из самолетных спектральных измерений интенсивности солнечной радиации. Сборник статей по материалам 4-ого межрегионального научного семинара «ЭКОЛОГИЯ И КОСМОС» СПб, НИХИ СПбГУ. 2010.
3. Гения Мванго Джефва, Ирина Мельникова, Чарльз Гатебе. Оптические параметры протяженного облака из самолетных измерений НАСА. Тезисы. Восьмая Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов) Москва, ИКИ РАН, 15 - 19 ноября 2010 г.
4. Genya M. Jefwa, I. Melnikova, C. K. Gatebe "Optical Parameters of extended Cloud from Airborne Observation". Thesis. 13th Conference on Atmospheric Radiation which will be held 28 June-2 July 2010. Portland, Oregon.

5. Мванго Г. Д., Мельникова И.Н., Гатебе Ч. Аналитическое решение обратной задачи оптики облаков в применении к самолетным измерениям интенсивности рассеянной солнечной радиации. Сборник ИКИ РАН «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», М. 2010 Т. 7, № 1, 99-111.
6. Гения Мванго Джефва., Оптические параметры протяженной облачности. Тезисы. Конференция РГГМУ. Февраль 2011 Санкт-Петербург.
7. Гения М.Д. Сравнительный анализ оптических параметров протяженного облака, полученных из самолетных измерений США (НАСА) и России (СПбГУ) Тезисы. VII Международная конференция «Естественные и антропогенные аэрозоли – 2011». Санкт-Петербург. 2011.
8. Genya Jefwa Mwango, Melnikova Irina, Gatebe Charles K. Comparing products of processing airborne NASA and Russian cloud data. Thesis. 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment. The GEOSS Era: Towards Operational Environmental Monitoring. Sydney. 10-15 April 2011
9. Genya Jefwa Mwango, Melnikova Irina, Gatebe Charles 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. 4 p., 2011
10. Гения М. Дж., Мельникова И. Н., Гатебе Ч. Сравнительный анализ результатов обработки данных самолетных радиационных наблюдений, выполненных в СССР и НАСА. Тезисы. Девятая открытая Всероссийская конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", Москва, ИКИ РАН, 14-18 ноября 2011
11. Мванго Джефва Гения, Ирина Н.Мельникова, Чарльз Гатебе. Регуляризация решения обратной задачи при обработке самолетных измерений. Тезисы. Межрегиональный научный семинар «ЭКОЛОГИЯ И КОСМОС», Санкт-Петербург, 09.02.2012

12. М.Д. Геня, И.Н.Мельникова, Ч. Гатебе. Регуляризация решения обратной задачи при обработке самолетных измерений. Сборник статей по материалам межрегионального научного семинара «ЭКОЛОГИЯ И КОСМОС» им. К.Я.Кондратьева. СПб, ВВМ. 2012
13. **М.Д. Геня, А.Д.Кузнецов, И.Н.Мельникова, Ч. Гатебе. Восстановление оптических параметров облаков из самолетных измерений. Регуляризация решения. Сравнение результатов разных экспериментов. Оптика атмосферы и океана. 2013. (В печати).**
14. **М.Д. Геня, А.Д.Кузнецов, И.Н.Мельникова, Ч. Гатебе. Сравнительный анализ оптических параметров облаков, полученных из самолетных измерений России (СПбГУ) и США (NASA). Изв. РАН. Сер. ФАО. 2013. (В печати).**
15. **М.Д. Геня, А.Д.Кузнецов, И.Н.Мельникова, Ч. Гатебе. Результаты обработки самолетных измерений интенсивности рассеянной солнечной радиации в облачной атмосфере. Ученые записки РГГМУ. 2012. (В печати)**
16. Melnikova I., Genya J.M., Gatebe C.K. Results of processing airborne NASA and Russian cloud data. Thesis. The International Radiation Symposium (IRS) 2012, Berlin, Germany, 06–10 August 2012
17. Melnikova I., Genya J.M., Gatebe C.K. Results of processing airborne NASA and Russian cloud data. Proceedings. The International Radiation Symposium (IRS) 2012, Berlin, Germany, 06–10 August 2012
18. Мванго М., Аналитическое решение обратной задачи оптики облаков, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012, 93 с.

**Геня Мванго Джефва**

