

**Зондирование атмосферы с помощью прибора  
SAGE III на российском МИСЗ  
«Метеор-3М №1»**

Поляков А.В., Ю.М. Тимофеев, А.М. Чайка, Я.А. Виролайнен

*Научно-исследовательский Институт Физики  
Санкт-Петербургского государственного университета  
polyakov@troll.phys.spbu.ru*

## **Основные направления работ:**

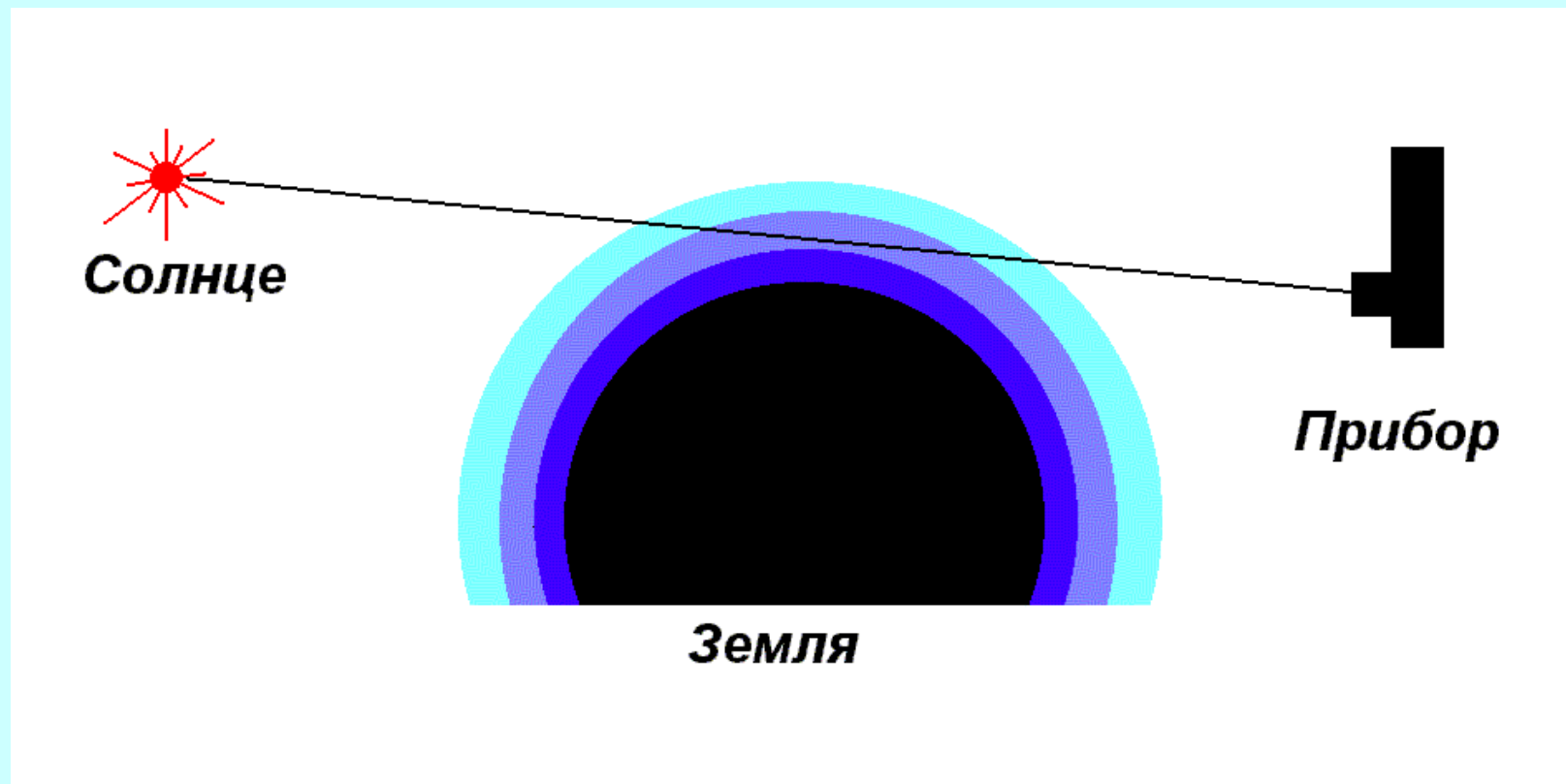
- 1. Определение газового состава атмосферы и оптических свойств аэрозоля на основе измерений прозрачности**
- 2. Определение интегральных микрофизических характеристик аэрозоля на основе его оптических свойств (коэффициента ослабления аэрозоля (КАО) на различных длинах волн)**
- 3. Регистрация и определение свойств полярных стратосферных облаков на основе измерений КАО на различных длинах волн**

## **прибор SAGE III**

**SAGE III (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment III) [www-sage3.larc.nasa.gov] был запущен на орбиту на борту российского спутника «Meteor-3М» 10-го декабря 2001, начал поставлять данные 27-го февраля 2002 и завершил 31 декабря 2005, окончательно прекратил работу в марте 2006.**

**SAGE III – дифракционный спектрофотометр с ПЗС динойкой, измеряет интенсивность солнечного излучения в непрерывной спектральной области 290–1030 нм и на 1550 нм. Около 85 дискретных величин (отдельных элементов ПЗС приемника или их комбинаций) передается для наземной обработки. Большая часть каналов расположена в полосах поглощения газов, и несколько – в прозрачных областях. Выделено 9 аэрозольных каналов: 1550, 1019–1024, 869, 755, 675, 601, 520, 447–450, 384 нм.**

## Метод прозрачности по Солнцу (затменный метод)



## **Затменный метод (по Солнцу)**

### **Преимущества:**

1. Высокая относительная точность радиационных измерений (для прозрачности по Солнцу)
2. Относительно простая физика переноса радиации
3. Высокая чувствительность измерений к изменчивости газовых и аэрозольной составляющих атмосферы
4. Автокалибровка измерений (переход к прозраčnostям)
5. Высокое вертикальное разрешение метода (1,5 – 2км)

### **Ограничения:**

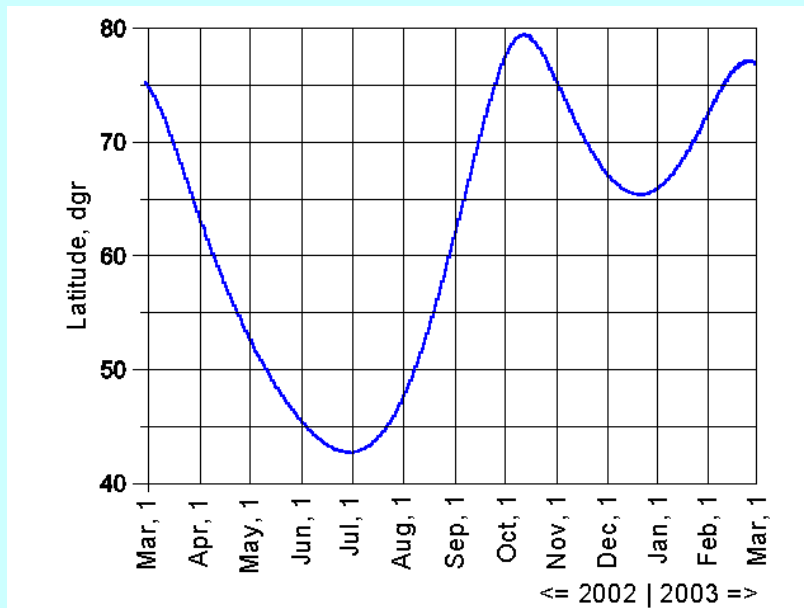
1. Сравнительно низкое горизонтальное разрешение метода (~300–500км)
2. Малая (~26 за сутки) частота измерений
3. Специфические условия захода или восхода Солнца – важно для ряда нестабильных газовых составляющих

## Особенности затменных измерений SAGE III

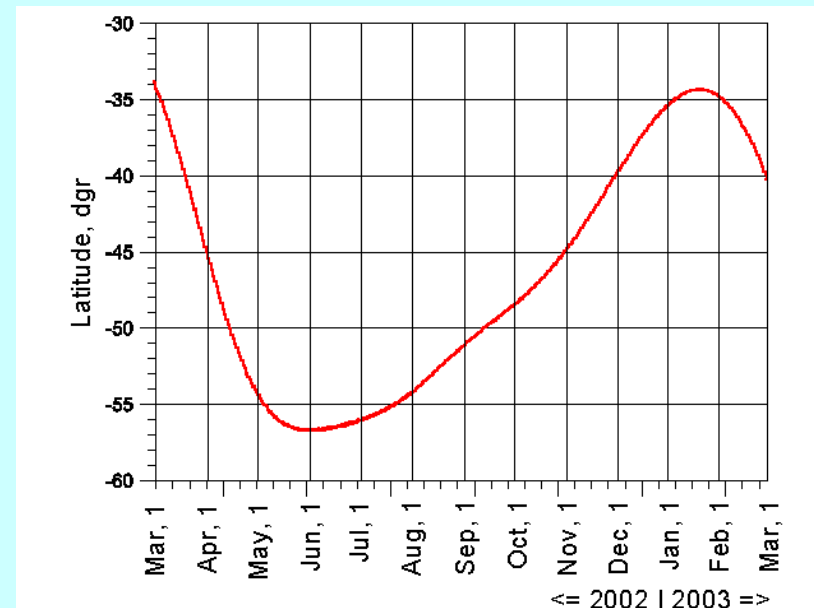
1. За один виток орбиты, длящийся около 1 ч. 45 м. выполняется два измерения (в северном и южном полушариях).
2. Эти измерения выполняются на терминаторе, т.е. в момент местного захода (или, реже, восхода).
3. Широта измерений меняется очень медленно (2 --3 периода за год), а долгота – примерно на  $26^\circ$  между соседними измерениями.
4. Широта измерений в северном полушарии меняется в диапазоне примерно  $40$  --  $80^\circ$ , в южном полушарии  $35$  --  $60^\circ$ .

# Пространственно-временное распределение измерений

Сочетание затменного метода и орбиты спутника приводит к тому, что измерения сосредоточены в определенных широтных поясах, и широта измерений меняется крайне медленно



Северное полушарие



Южное полушарие

## Сравнение алгоритмов обработки СПБГУ и NASA

**Новый алгоритм** был разработан независимо для восстановления содержания газов в атмосфере и аэрозольного поглощения из данных о прозрачности, даваемых прибором SAGE III.

**Этот алгоритм** отличается от операционного алгоритма NASA несколькими ключевыми моментами:

- алгоритм **учитывает конечные высотное и спектральное разрешение** измерений путем интегрирования по спектру и высоте;
- решается **нелинейная задача** с использованием метода **статистической регуляризации** (оптимального оценивания);
- исходная информация - **функции пропускания** (а не оптические плотности, как в алгоритме NASA);
- **аэрозольное ослабление параметризуется** путем оптимального разложения по собственным векторам корреляционной матрицы аэрозольного ослабления.

Эта матрица была построена путем численного моделирования на основе ансамбля **моделей стратосферного и тропосферного аэрозоля** (см. Timofeyev et al, 2003; Виролайнен и др., 2004).

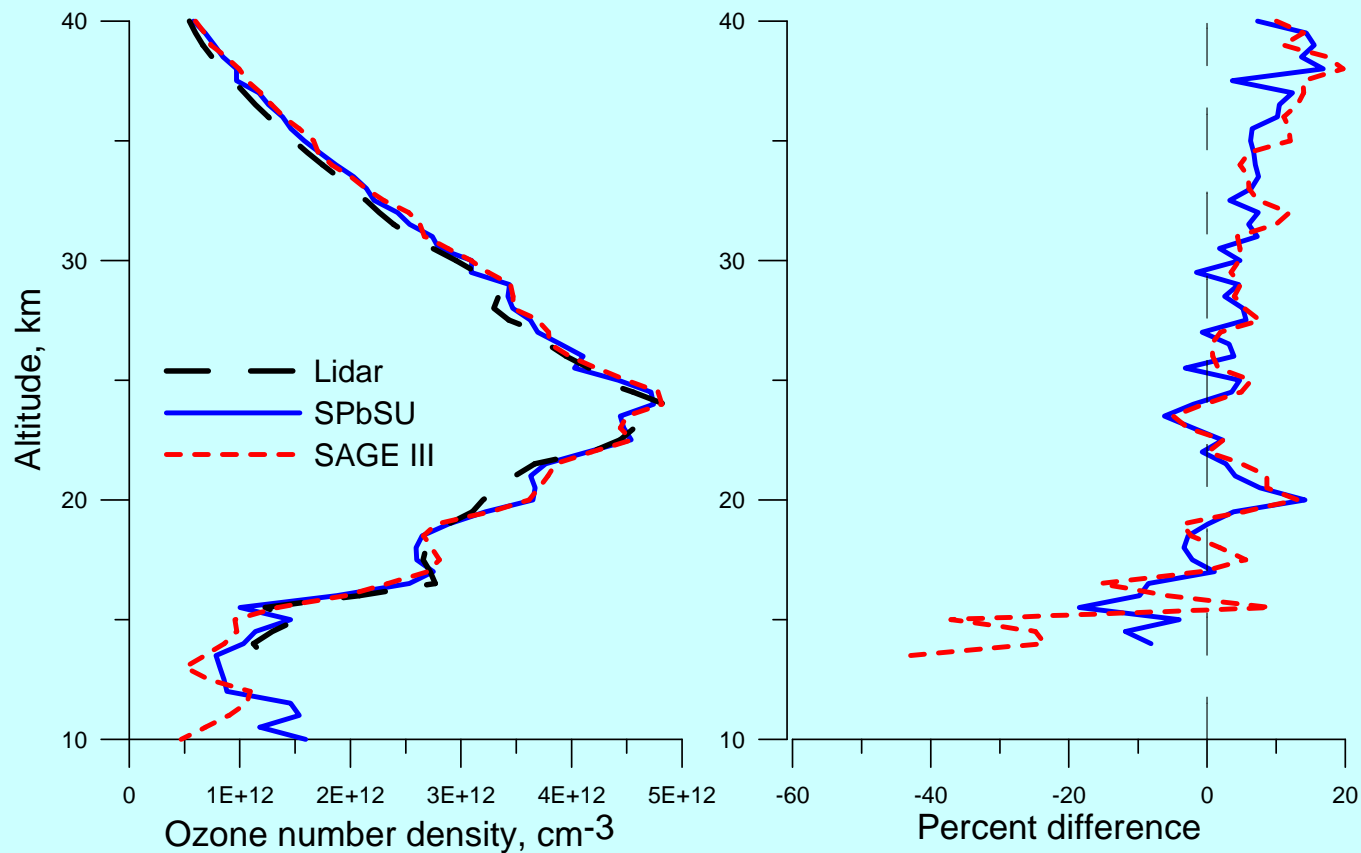


## Сравнения и валидация

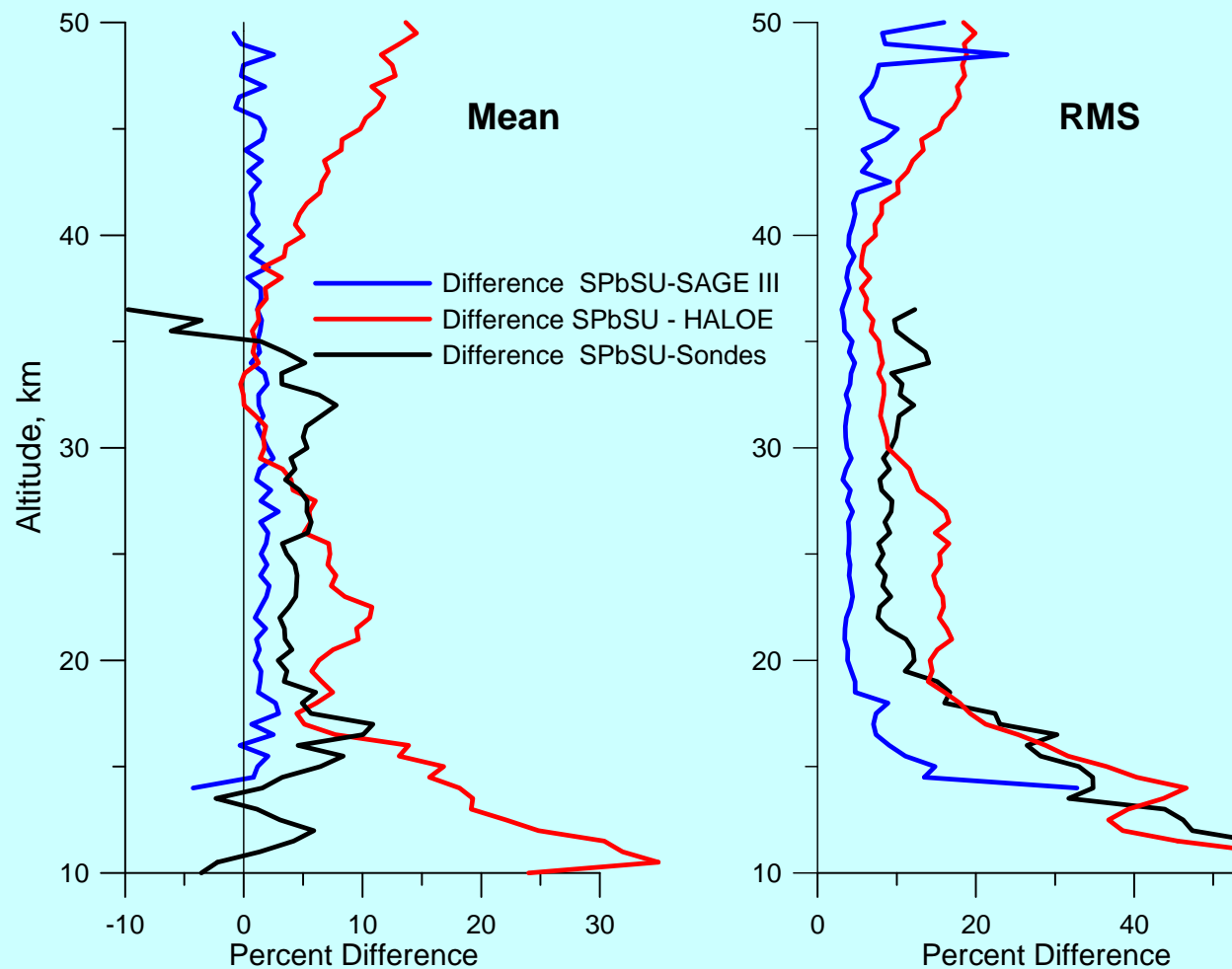
1. Климатологические модели
2. CRISTA I
3. HALOE
4. POAM III
5. SAGE III – оперативная обработка
6. Озонозонды
7. Лидар
8. Аэрозольные зонды
9. Численные 3-D модели

# Сравнение профилей озона, восстановленных по данным SAGE III (СПБГУ и оперативно) и лидарных

SAGE III, event ID 314720, 07/28/02, 19:03, 46.63N, 7.21E;  
LIDAR, Hohenpasseberg. Distance - 312 km, 23 h

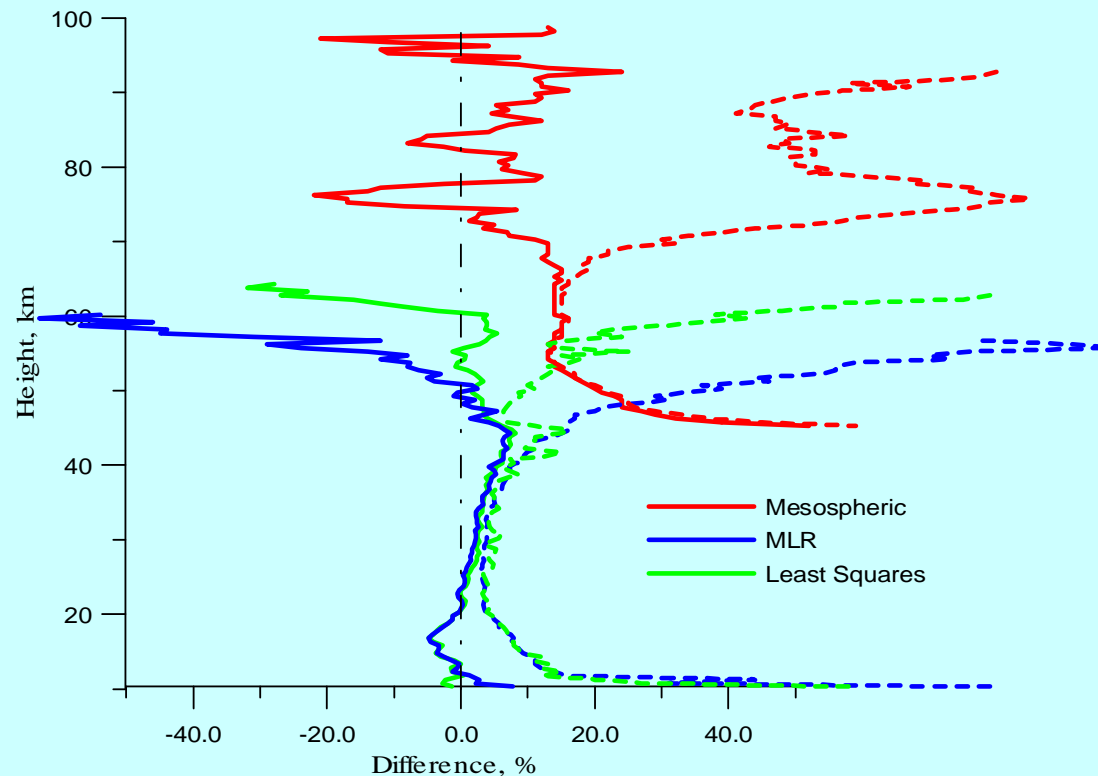


# Сравнение профилей озона, восстановленных СПБГУ с данными HALOE, SAGE III (level 2) и ОЗОНОЗОНДОВЫМИ



В сравнении использованы 45 озонозондовых профилей

# Сравнение профилей озона, восстановленных СБГУ и NASA



Ниже 45 км (за исключением высотной области 10–12 км) результаты хорошо согласуются (в пределах 5–7% и 10% для средних и среднеквадратичных отклонений)

На высотах 45–65 км различия в среднем около 20%.

Выше 65 км различия увеличиваются до 50% и более.

Средние (сплошные линии) и среднеквадратичные (пунктир) разности

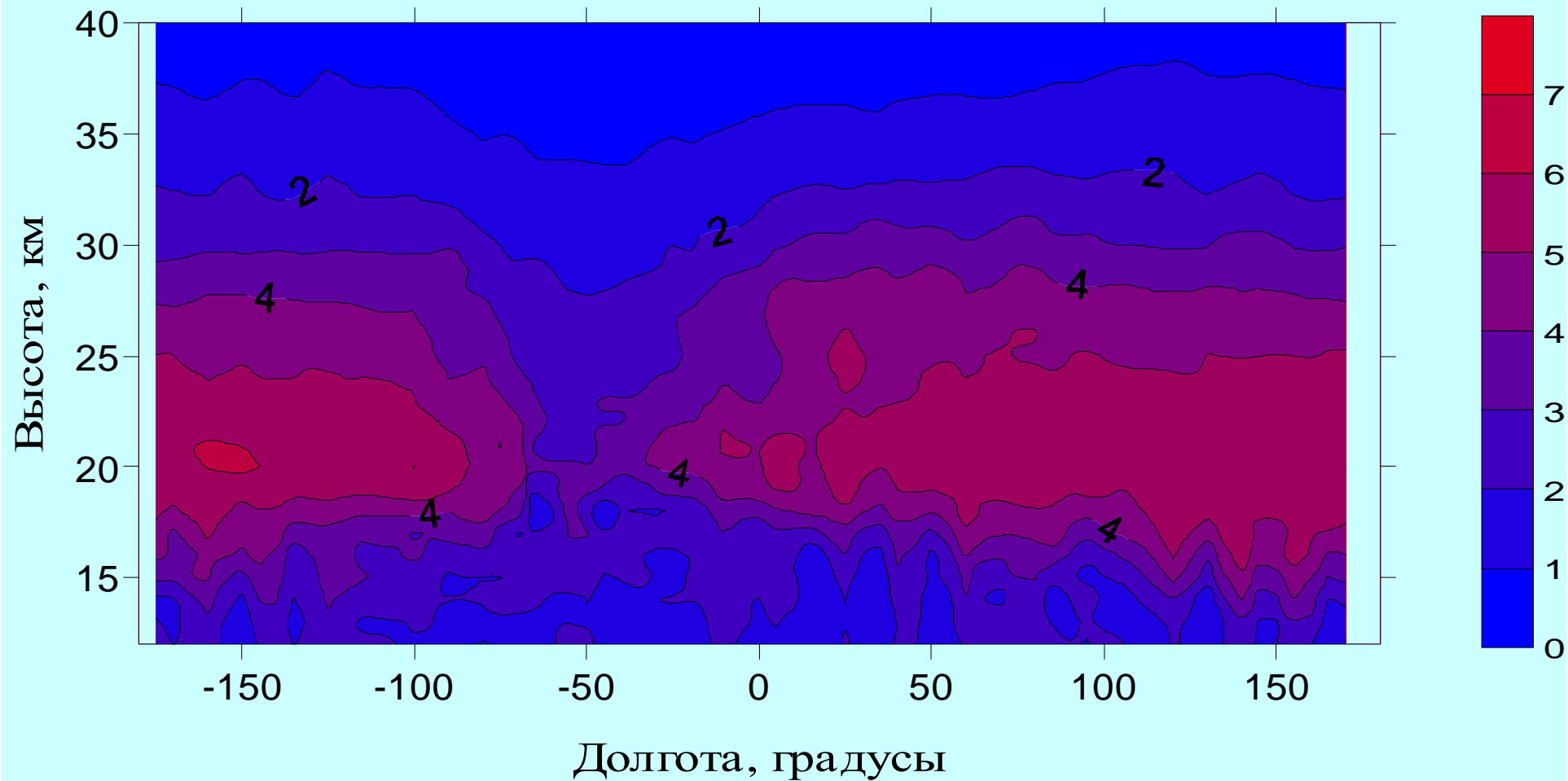
200 измерений, 01-08 апреля 2003.

NASA восстановления: **мезосферные** — из измерений в полосе Хартли-Хюгенса, методами **множественной линейной регрессии** и **наименьших квадратов** — из измерений в полосе Шаппуи.

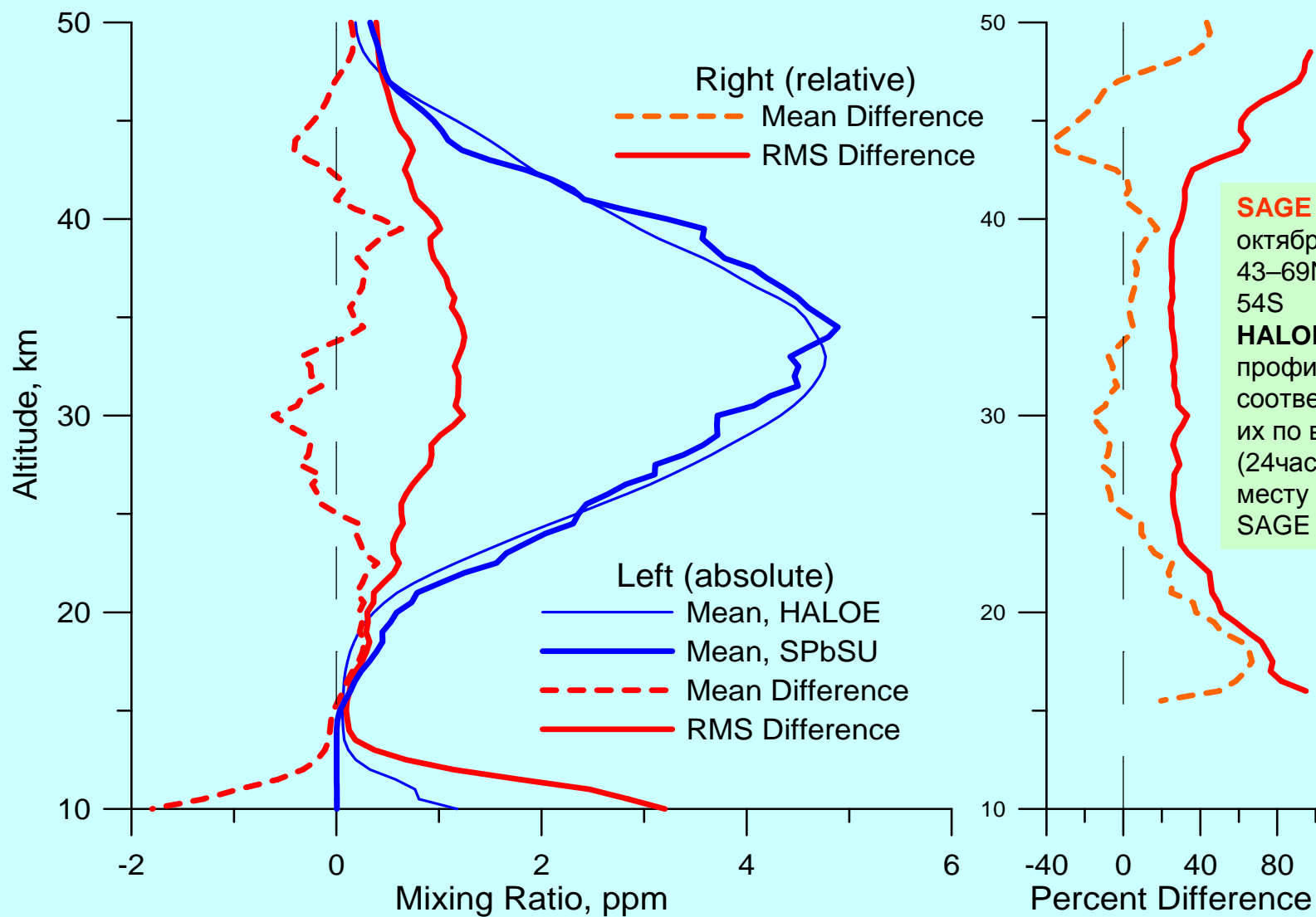
# Долготно-высотное распределение озона, $10^{12}$ см $^{-3}$

2003/10/07 - 2003/10/09

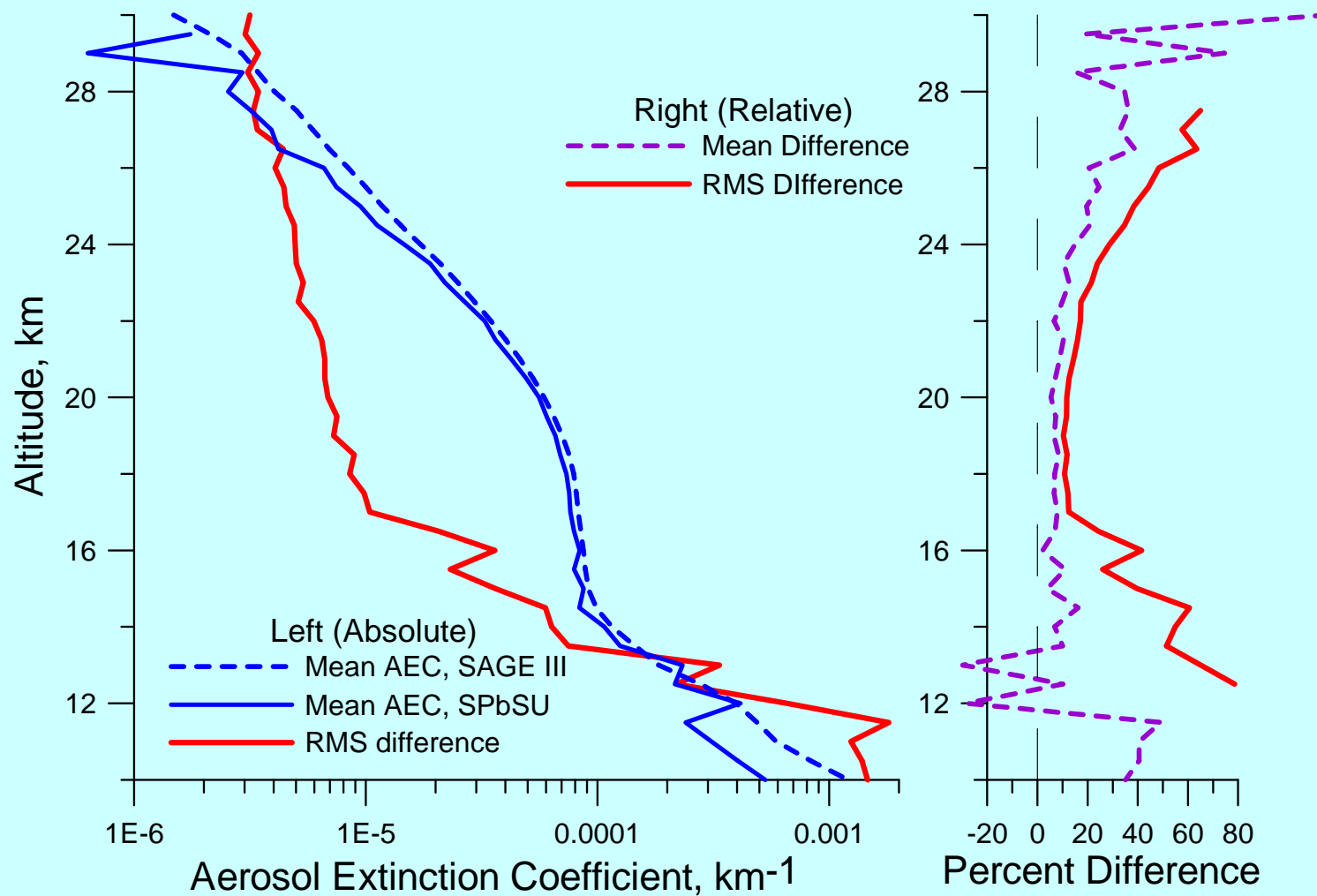
0909910 - 0913920 50.83 - 50.51



# Сопоставление профилей $\text{NO}_2$ с данными HALOE



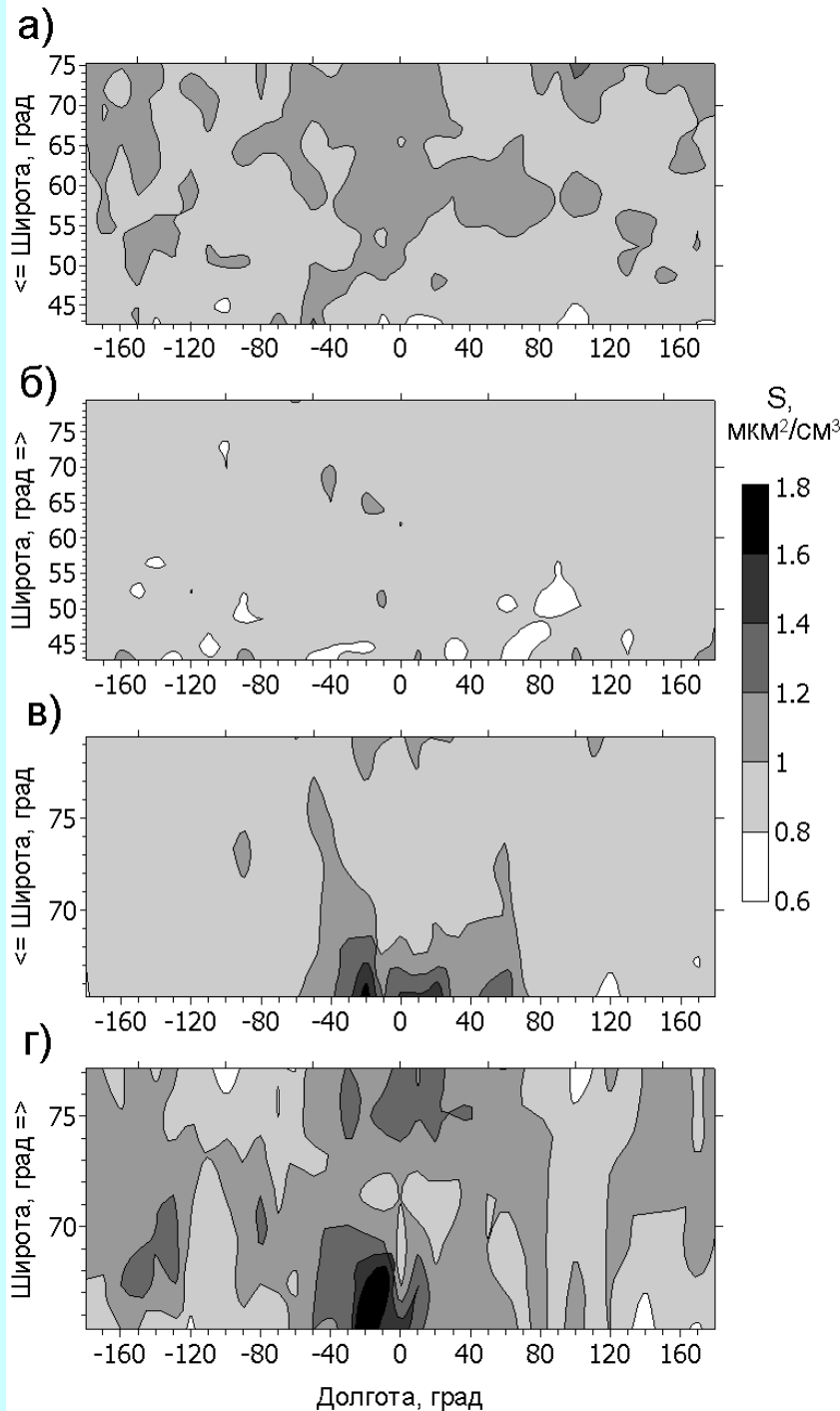
# Сопоставление КАО по восстановлениям СПБГУ и NASA (level 2 data) ( $\lambda = 1021 \text{ nm}$ )



## Исходные данные для исследования аэрозоля и ПСО

Высотные профили измеренного коэффициента ослабления в данных уровня 2 представлены на 9 длинах волн (**385, 448, 521, 596, 676, 754, 868, 1019, и ~1550 нм**) на высотах ниже 40 км. Погрешность этих данных колеблется в зависимости от ряда различных причин от нескольких процентов до величин, превосходящих 100%. Эти данные о профилях коэффициента ослабления на 9 длинах волн мы и используем как исходные для наших исследований интегральных микрофизических параметров аэрозоля и ПСО





**Рис. 23а–г. Широтно-долготные распределения площадей  $S$  (средние значения для высотного слоя 15-20 км) для различных периодов измерений:**

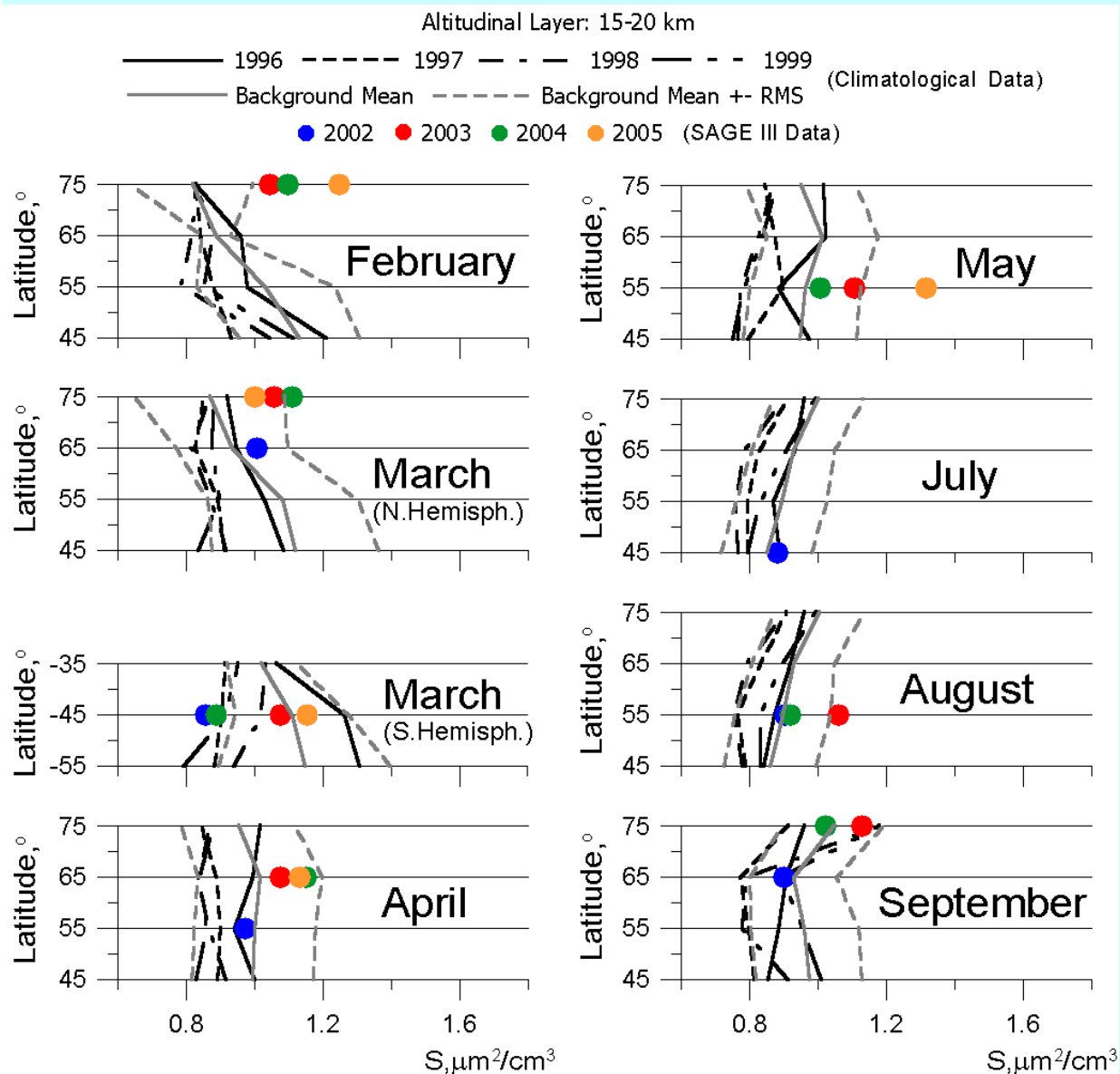
**а) 27 февраля 2002 – 30 июня 2002;**

**б) 2 июля 2002 – 13 октября 2002;**

**в) 13 октября 2002 – 22 декабря 2002;**

**г) 22 декабря 2002 – 1 марта 2003.**

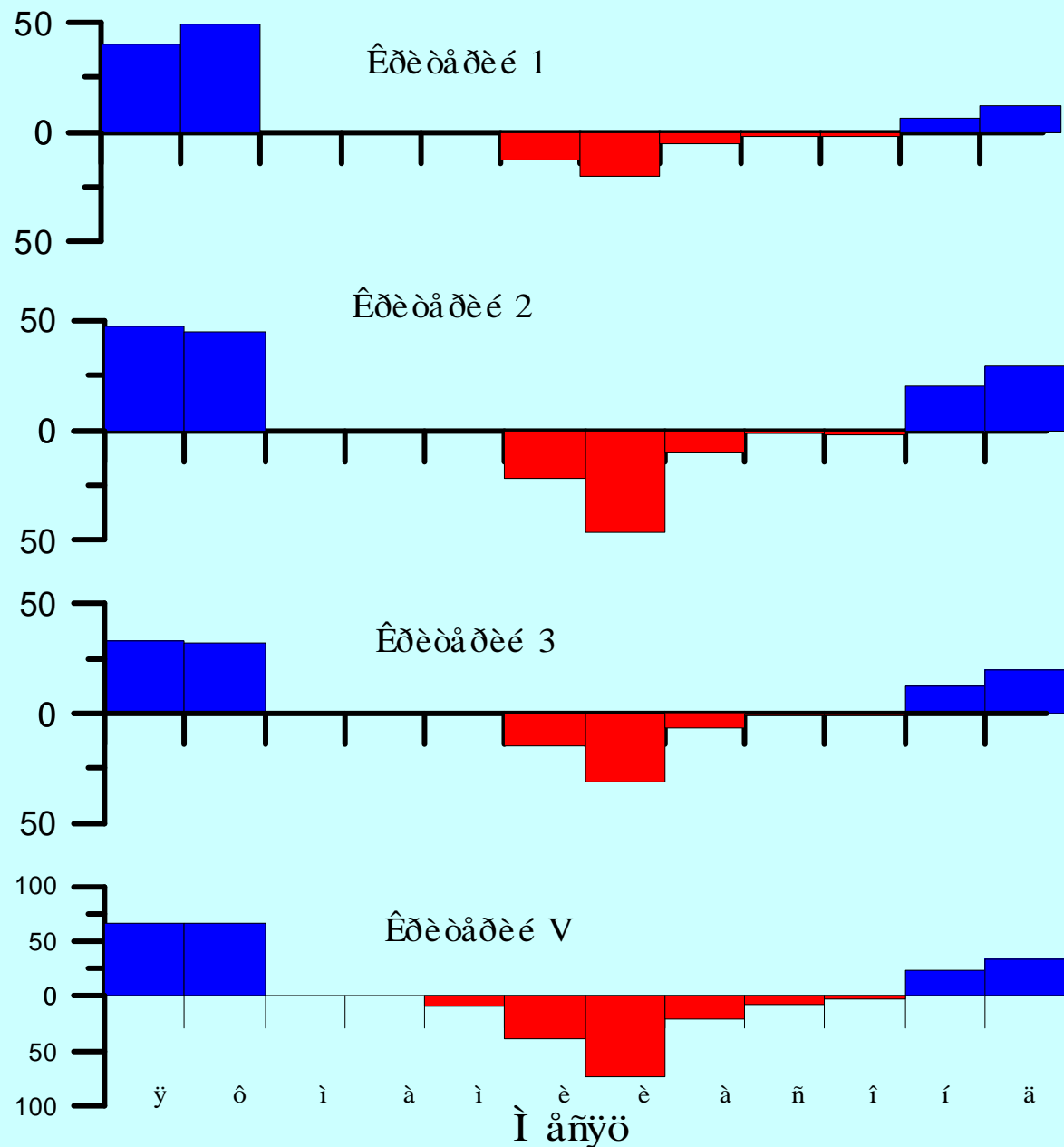
## Сравнение с климатологией



На основе данных измерений приборов SAM II, SAGE I и SAGE II. Данные о среднезональных, месячных интегральных площадях стратосферного аэрозоля для периода 1979–1999 г.г. подготовлены David B. Considine, NASA Langley Research Center, USA. Данные относятся к фоновому периоду состояния стратосферного аэрозоля (1996–1999 г.г.)

Таблица **Критерии выделения ПСО**

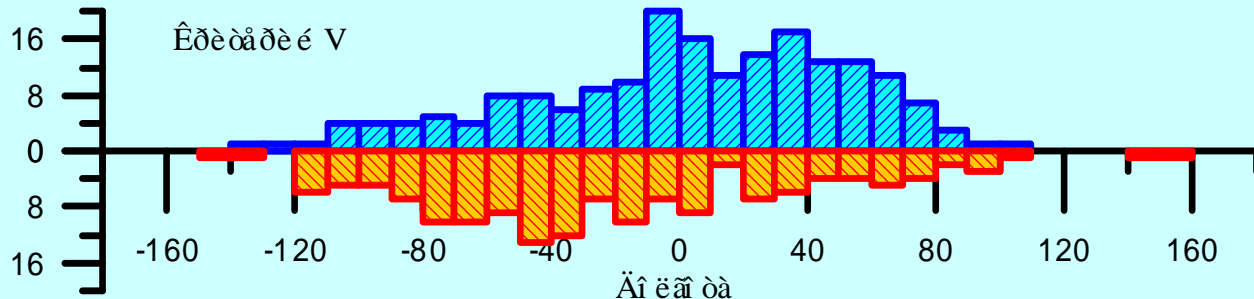
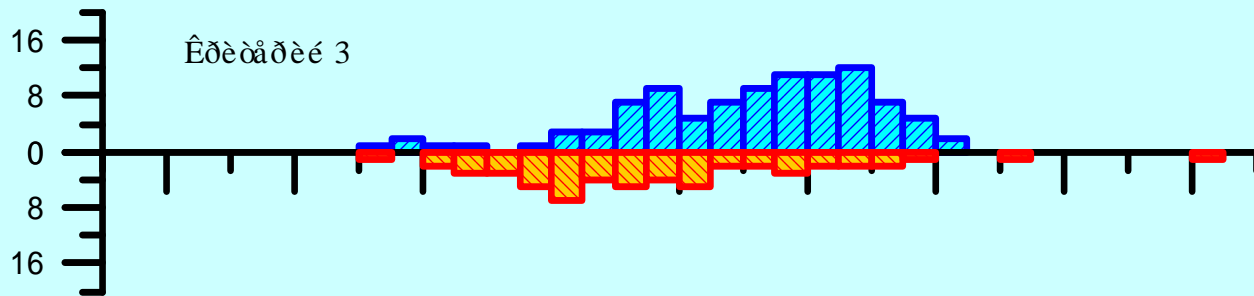
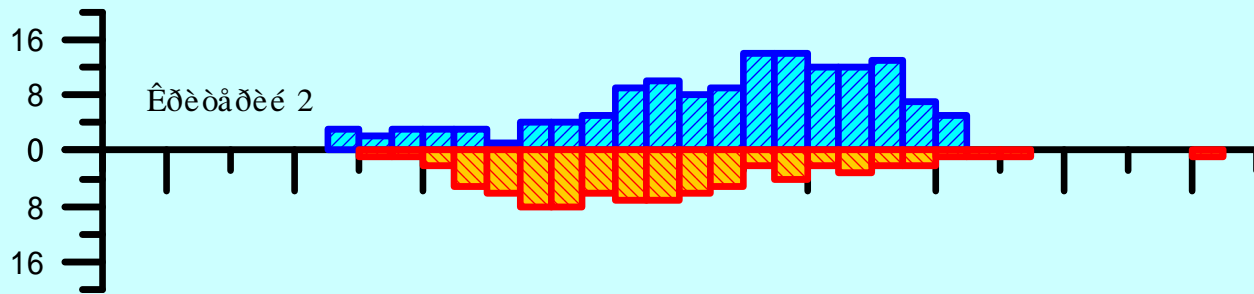
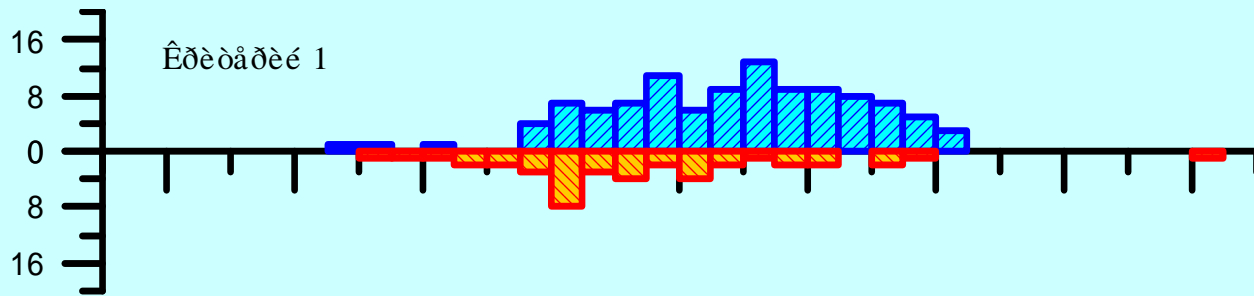
Условное название	Обозначение	Критерии	ссылка
Ослабление на 1 мкм	<b>1</b>	КО на длине волны 1 мкм больше $0.0008\text{км}^{-1}$	<b>McCormick et al., 1982</b>
Две точки спектра 0.52 и 1 мкм	<b>2</b>	КО на длине волны 0.52 мкм менее чем в 2 раза превосходит КО на 1 мкм	<b>Pitts et al., 1990</b>
Три точки спектра	<b>3</b>	Точки плоскости, координаты которых равны отношению КО на парах длин волн, лежат внутри заданного прямоугольника	<b>G.S. Kent et al, 1997</b>
Близость к линейному подпространству ПСО	<b>V</b>	Вектор спектрального КО ближе к $n$ -мерному подпространству ПСО, чем к ФСА.	Настоящая работа



**Сезонное  
распределение  
ПСО –  
количество  
наблюдений за  
месяц.**

**Синий –  
северное,**

**Красный –  
южное  
полушария**



**Долготное  
распределение  
ПСО –  
количество  
наблюдений в  
10-и градусном  
интервале  
долгот.  
Синий – северное,  
красный – южное  
полушария.**

**Статистические характеристики ПСО, выделенных различными методами. В каждой клетке таблицы приведены среднее (сверху) и СКО (внизу)**

Критерий	Верх, км	Низ, км	Средняя высота, км	T, К	S, мкм <sup>2</sup> /см <sup>3</sup>	V, мкм <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	S <sub>NAT</sub> , мкм <sup>2</sup> /см <sup>3</sup>	V <sub>NAT</sub> , мкм <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>
1	21.3	19.2	19.4	191.1	4.39	4.24	0.35	1.14
	7.3	6.8	2.8	2.35	2.52	3.38	0.81	1.83
2	21.0	18.9	21.0	192.0	2.35	2.20	0.38	1.0
	7.1	6.4	2.9	2.2	2.71	3.59	0.66	1.55
3	21.1	19.1	20.9	191.6	3.01	3.03	0.45	1.18
	7.2	6.5	3.0	2.2	3.07	4.20	0.82	1.90
V	21.0	20.2	20.6	192.4	1.83	1.78	0.41	1.13
	6.7	6.4	2.6	2.2	2.16	3.14	0.57	1.31

## Выводы

- Разработан **оригинальный метод** интерпретации измерений прозрачности SAGE III и с его помощью получены **профили: озона** (10–90 км), **NO<sub>2</sub>** (10–40 км), **спектральный КАО** (10–35 км);
- Метод **линейной регрессии** применен для определения **площадей и объемам аэрозольных частиц** по спектральным измерениям КАО
- Выделены случаи наблюдения ПСО и **получены физические и интегральные микрофизические параметры ПСО**

Результаты (более 30000 измерений) можно взять на моей персональной страничке

[http://troll.phys.spbu.ru/Personal\\_pages/Polyakov/sagedat.htm](http://troll.phys.spbu.ru/Personal_pages/Polyakov/sagedat.htm)

## Основные результаты опубликованы в работах

- 1) Поляков А.В., Тимофеев Ю.М. Влияние алгоритма решения обратной задачи на результаты зондирования атмосферы затменным методом (аппаратура SAGE III) // Исслед. Земли из космоса. – 2004. – №5. –С. 15–20.
- 2) A.V. Polyakov, Yu.M. Timofeyev, D.V. Ionov, Ya.A. Virolainen, H.M. Steele, M.J. Newchurch Retrieval of ozone and nitrogen dioxide concentration from Stratospheric Aerosol and Gas Experiment III (SAGE III) measurement using a new algorithm // JGR. . –2005. –V110. –D06303. doi:10.1029/2004JD005060
- 3) Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Ионов Д.В., Стил Х., Ньючерч М. Новая интерпретация измерений прозрачности спутниковым спектрометром SAGE III // Изв. РАН, ФАО. –2005. –Т41. –№3. –С 410–422.
- 4) А.М. Чайка, Ю.М. Тимофеев, А.В. Поляков Стратосферный аэрозоль по данным измерений аппаратуры SAGE III // Исследование Земли из космоса.–2007. –№2. –С10–18
- 5) К. Hocke, N. Kampfer, D. Ruffieux, L. Froidevaux, A. Parrish, I. Boyd, T.v Clarmann, T. Steck, Yu.M. Timofeyev, A.V. Polyakov, E. Kyrola Comparison and synergy of stratospheric ozone measurements by satellite limb sounders and the ground-based microwave radiometer SOMORA // Atmos. Chem. Phys., –2007. –V. 7. –P. 4117–4131.
- 6) А.В. Поляков, А.М. Шаламянский Анализ полей озона по данным российско-американского космического эксперимента SAGE III /Физика атмосферы: Наука и образование. СПб.; СПбГУ. –2007. –С. 52–57.
- 7) А.В. Поляков, К. Рэндалл, Л. Харвей, К. Хоке Новый усовершенствованный алгоритм интерпретации затменных измерений прибором SAGE III// Исследования Земли из Космоса. –2008. –№1, –С. 31–36.
- 8) А.М. Чайка, Ю.М. Тимофеев, А.В. Поляков Интегральные микрофизические параметры фонового стратосферного аэрозоля в 2002-2005 гг.(спутниковый эксперимент с аппаратурой SAGE III) Изв. РАН, Физика Атмосферы и Океана. –2008. –Т.44. –№ 2, –С. 206–220
- 9) А.В. Поляков, Ю.М. Тимофеев, Я.А. Виролайнен Полярные стратосферные облака по данным спутниковых наблюдений прибора SAGE III // Изв РАН ФАО. –2008. –Т 44. –№4.
- 10) В.С. Косцов, А.В. Поляков, А.В. Ракитин, Д.В. Ионов Результаты определения содержания NO<sub>2</sub> в стратосфере по данным эксперимента SAGE III // Иссл. Земли из космоса. –2008. –№5. –С. 16–28.



## Благодарности:

Авторы благодарят W. Chu, Ю.А. Борисова, Н.М. Steele, M.J. Newchurch и многих других российских и зарубежных коллег за полезные обсуждения и помощь в получении информации.

SAGE III data level 1B and 2 were obtained from the NASA Langley Research Center Atmospheric Sciences Data Center.

Работа выполнялась при поддержке грантов РФФИ 03-05-64626, 05-05-65305, 06-05-64909, 06-05-64987 и Министерства образования и науки РФ РНП.2.1.1.4166 и РНП.2.2.1.1.3836.

**Спасибо за внимание**