

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

УДК 551.501.86:551.508.953

### НОВЫЙ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЗАТМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИБОРОМ SAGE III

© 2008 г. А. В. Поляков<sup>1\*</sup>, К. Рэндалл<sup>2</sup>, Л. Харвей<sup>2</sup>, К. Хоке<sup>3</sup>

<sup>1</sup>НИИ Физики, Санкт-Петербургский государственный университет

<sup>2</sup>Университет Колорадо, Боулдер, США

<sup>3</sup>Институт прикладной физики, Бернский университет, Берн, Швейцария

\*Тел. (812)225-22-65; e-mail: polyakov@troll.phys.spbu.ru

Поступила в редакцию 08.05.2007 г.

Приводится описание новой, усовершенствованной версии системы обработки данных SAGE III и анализ ее качества. В ней учитывается вид высотной аппаратной функции измерений, оценивается и включается в алгоритм паразитная засветка в УФ-каналах прибора, что позволяет существенно улучшить согласие физико-математической модели эксперимента и результатов натурных измерений. Профили озона, полученные по новому алгоритму, сравниваются с результатами оперативной методики NASA и независимыми данными наземных и спутниковых измерений. Следует отметить хорошее согласие полученных результатов с данными SAGE II, что делает целесообразным их совместное использование. В отличие от оперативной методики NASA, наш алгоритм позволяет получить единый профиль озона в диапазоне высот 10–90 км.

#### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы чрезвычайно большое значение придается проблеме изучения изменения климата Земли и разрушения озонового слоя нашей планеты, обусловленных, в частности, изменениями газового состава атмосферы [1–4]. В связи с этим создана глобальная система мониторинга характеристик газового состава атмосферы, состоящая из наземной, самолетной и спутниковой частей. Важной составной частью глобальной системы наблюдений за составом атмосферы является космическая система наблюдений, бурное развитие которой наблюдается последние два–три десятилетия. Спутниковые методы измерений интенсивно используются для изучения характеристик газового состава атмосферы и, прежде всего, для исследований пространственно-временных вариаций и трендов в содержании озона [5, 6]. Одним из эффективных спутниковых методов является затменный метод, основанный на измерении поглощения атмосферой солнечного излучения на касательных трассах при восходе и заходе Солнца за горизонт планеты [5]. Этот метод характеризуется высокой потенциальной точностью, хорошим высотным разрешением, отсутствием необходимости абсолютной калибровки прибора для получения функций пропускания (ФП). С применением этого метода проводился и проводится целый ряд спутниковых экспериментов [5]. Первый многоспектральный спутниковый эксперимент был проведен с помощью аппаратуры “Озон–Мир” в 1996–1997 гг. [7]. С мая 2002 по июнь 2006 г. на борту российского

спутника “Метеор-3М № 1” оперативно функционировал прибор SAGE III [8], продолживший серию приборов SAM, SAM II, SAGE, SAGE II, последний из которых проработал на орбите более 20 лет.

Растущие современные требования к точности дистанционных измерений делают необходимым постоянное развитие и совершенствование физико-математических моделей спутниковых экспериментов и алгоритмов обращения измерений. В работах [9, 10] описана оригинальная методика интерпретации измерений, выполненная прибором SAGE III, которая была разработана в отделе физики атмосферы НИИФ СПбГУ (версия 2), а также приведены примеры ее использования. Настоящая статья посвящена описанию новой, усовершенствованной версии системы обработки данных SAGE III и анализу ее качества.

#### УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ SAGE III (ВЕРСИЯ 3)

Оперативная методика [11] обработки измерений, выполненных прибором SAGE III, используемая в NASA для интерпретации измерений, основана на ряде приближений. В частности, вместо ФП атмосферы используются оптические толщины (решается линейная обратная задача); спектральное и высотное интегрирование выполняются приближенно; аэрозольное ослабление учитывается с использованием упрощающих предположений и т.д. В работах [9, 10] была опи-

Нормированные среднеквадратические отклонения между ФП, рассчитанными с различными аппаратными функциями, и измерениями SAGE III

Длина волны канала, нм	Условия расчета невязки	Кодовый номер измерения SAGE III		
		662020	664520	664620
284	Без засветки	27.5	30.7	27.3
	С засветкой	2.4	3.6	3.5
290	Без засветки	27.0	27.7	24.7
	С засветкой	2.9	6.8	3.4
296	Без засветки	26.5	25.9	25.5
	С засветкой	3.4	4.0	2.6

сана методика интерпретации, свободная от ряда перечисленных приближений (версия 2). Однако в процессе ее эксплуатации выяснилось, что ряд параметров прибора был задан со значительными погрешностями. Поэтому на основе анализа полученных данных и привлечения дополнительных независимых измерений (данные измерений спутниковой аппаратуры POAM III) была проведена корректировка высотной и спектральной аппаратной функций прибора SAGE III.

#### *Корректировка высотной аппаратной функции*

Напомним, что в версии 2 алгоритма интерпретации [9, 10] мы использовали, опираясь на сведения из отчета [12], прямоугольные высотные аппаратные функции с шириной 0.5 км. Анализ методики получения измеренных функций пропускания (данных уровня 1b) в NASA показал, что:

- высотная (вертикальная) аппаратная функция данных уровня 1b представляет собой в первом приближении равнобедренный треугольник со сглаженной вершиной;

- величина полуширины функции заметно меняется с прицельной высотой измерений, как по чисто геометрическим причинам (2% в диапазоне прицельных высот 0–100 км), так и вследствие рефракции (влияние рефракции становится заметным ниже 30 км и достигает более 10% у поверхности Земли);

- асимметрия высотной аппаратной функции, вызванная рефракцией и ростом показателя преломления воздуха с уменьшением высоты, для рассмотренных гладких профилей плотности воздуха составляет менее 1%;

- в зависимости от используемой модели атмосферы величина полуширины аппаратной функции меняется более чем на 10%.

Все эти особенности поведения высотной аппаратной функции прибора SAGE III были учтены в усовершенствованной версии 3.

#### *Корректировка спектральных аппаратных функций*

Анализ сопоставления рассчитанных и измеренных SAGE III ФП на касательных трассах показал, что в трех УФ-каналах SAGE III измеренные ФП (данные уровня 1b версии 3.0) заведомо завышены на прицельных высотах ниже 50 км. Простое предположение о ненулевой чувствительности прибора к излучению вне указанных в документации [12] спектральных интервалов является одним из возможных объяснений такого завышения.

Для уточнения спектральных аппаратных функций прибора было проведено решение своеобразной обратной задачи относительно спектральных аппаратных функций на основе привлечения независимых спутниковых данных по вертикальным профилям содержания озона, двуокиси азота и коэффициентов аэрозольного ослабления (КАО), совпадающих в пространстве и во времени с измерениями SAGE III. Для этого использовались профили, восстановленные по данным прибора POAM III [13], ранее тщательно провалидированные по независимым измерениям. С помощью алгоритма минимизации невязки между рассчитанными и измеренными SAGE III ФП были скорректированы спектральные аппаратные функции. В таблице приведены нормированные (т.е. идеальное теоретическое значение – единица) величины невязок в УФ-каналах прибора, полученных с использованием предположения о засветке и без него. Как видно из таблицы, использование полученных уточненных спектральных аппаратных функций позволило в большинстве случаев уменьшить в трех УФ-каналах прибора среднеквадратичную нормированную разность между измеренными и рассчитанными ФП до 10 и более раз.

ФП теперь вычисляются как отношение рассчитанных атмосферного и внеатмосферного спектров с учетом спектра излучения Солнца высокого разрешения [14]. Кроме того, учитываются аппаратные функции прибора в области максимальной чувствительности каждого канала SAGE III, полученные в результате лабораторных измерений и любезно переданные нам Вильямом Чу (William Chu), руководителем проекта SAGE III (ранее использовалась прямоугольная аппаратная функция). Наконец, в новой версии программы при решении нелинейной обратной задачи в зависимости от широты и сезона измерений выполняется выбор среднеклиматических профилей озона в качестве начального приближения реше-

ния и среднестатистического априорной информации.

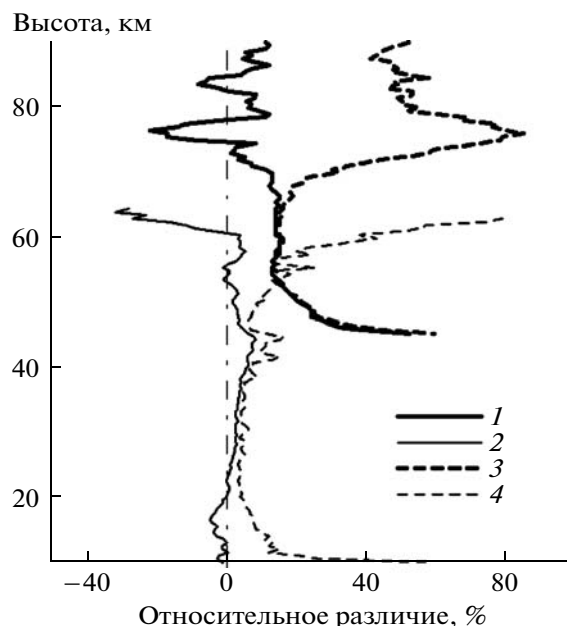
Следует также заметить, что восстановленные нами профили озона и двуокиси азота скорректированы с учетом их горизонтальной неоднородности и нестационарности их состояния в области терминатора по методике, описанной в работе [15] и приведены к терминатору.

### АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ВОССТАНОВЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА ПО НОВОЙ ВЕРСИИ

Для анализа качества получаемых по новой версии алгоритма интерпретации профилей озона мы провели их сравнение: а) с результатами восстановления оперативной обработки NASA – данными уровня 2; б) с независимыми измерениями озонозондами. В случае б) мы использовали ранее отобранные для сравнений данные озонозондирования [9, 10].

На рис. 1 приведены сопоставления профилей озона: восстановленных по нашей методике и в результате оперативной обработки NASA (выборка – 200 измерений в период 01–08 апреля 2003 г.). Напомним, что в оперативном алгоритме NASA используются три метода восстановления профилей озона: восстанавливается профиль в мезосфере (восстановление озона по УФ-каналам, на рис. 1 сравнение с этим профилем обозначено NASA2) и два варианта профиля в стратосфере по измерениям в видимой (ВИД) области спектра, полученных с помощью множественной линейной регрессии (МЛР, NASA3) и методом наименьших квадратов (МНК, NASA4). Отметим, что наша система обработки имеет то преимущество, что она позволяет получить единый профиль от 10 до 85–95 км, в то время как оперативные методики NASA дают различные профили в стратосфере (10–50 км) и мезосфере (45–90 км), взаимно противоречивые в области высот 45–50 км.

Анализируя рис. 1, можно заключить, что в диапазоне высот 12–45 км наблюдается согласие между нашими и NASA результатами в пределах до 5–7% по среднему и до 10% по среднеквадратичному отклонению. В диапазоне высот 55–65 км наши результаты отличаются от данных NASA с систематическим различием около 20% (среднеквадратичное тоже около 20%, т.е. можно сделать вывод, что в различиях преобладает систематическая компонента). Выше 65 км среднее различие колеблется, меняя знак, но остается в пределах 20–30%, а среднеквадратичное выходит за пределы шкалы (более 50%). Таким образом, наши результаты существенно отличаются от результатов NASA выше 45–50 км и близки к ним на меньших высотах, что и следовало ожидать в результате коррекции сигнала в УФ-каналах.

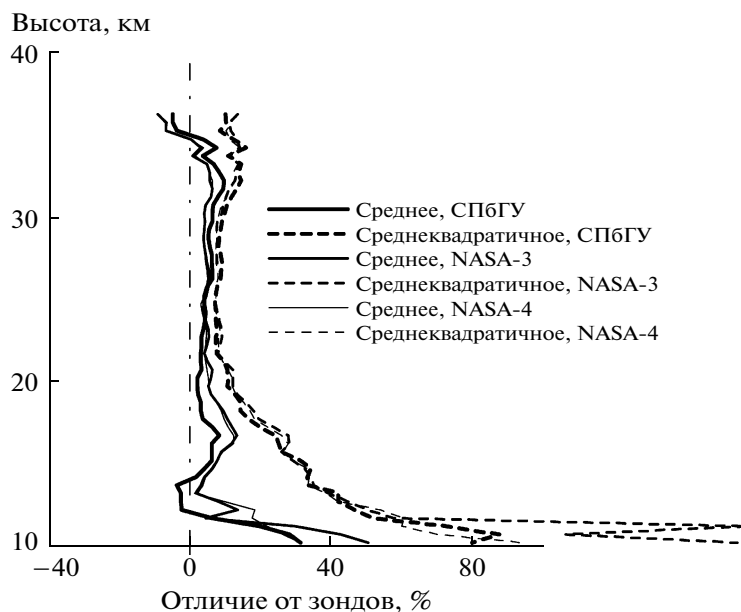


**Рис. 1.** Средние (сплошная линия) и среднеквадратичные (пунктир) относительные различия восстановленных профилей по алгоритму версии 3 и результатов оперативной обработки NASA: NASA-2 – мезосферные профили, NASA-4 – стратосферные профили, МНК. Выборка – 200 измерений в период 01–08 апреля 2003. 1 – NASA-2, средняя разница; 2 – NASA-4, средняя разница; 3 – NASA-2, среднеквадратичная разница, 4 – NASA-4, среднеквадратичная разница.

На рис. 2 показаны результаты сопоставления восстановленных тремя способами (наш вариант и два варианта оперативной обработки NASA) профилей озона с данными озонозондирования (51 случай, расстояние менее 500 км, различие по времени менее 24 час).

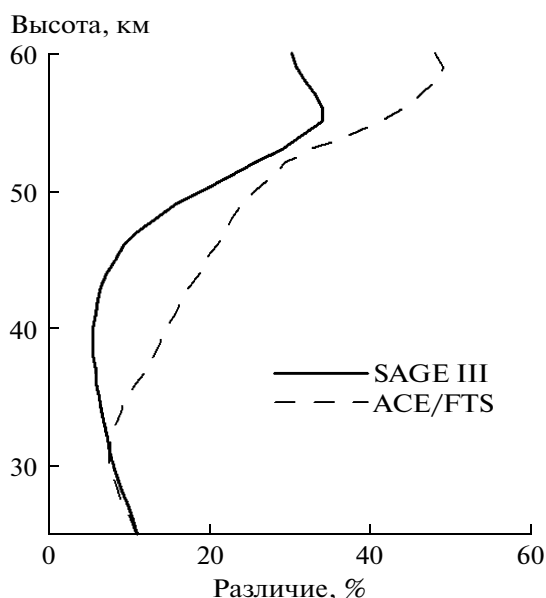
Из рис. 2 видно, что за исключением высот менее 11.5–12 км все методы демонстрируют мало различающиеся среднеквадратичные отличия от озонозондов. Для средних отличий наблюдается заметная разница: наш метод показывает примерно вдвое меньшие средние отличия от зондов на высотах менее 25 км и немного большие на высотах более 25 км, чем оперативные методики NASA. Практически можно заключить, что сравнение с озонозондами также подтверждает, что все три методики на высотах 12–35 км дают результаты примерно одного качества, хотя наша имеет некоторое преимущество для высот ниже 25 км.

Для валидации и согласования различных спутниковых измерений содержания озона были проведены их сопоставления с наземными микроволновыми (МКВ) измерениями озона [16]. Данные МКВ-зондирования использовались в качестве промежуточного стандарта. На рис. 3



**Рис. 2.** Средние и среднеквадратичные различия восстановленных и измеренных озонозондами профилей озона: СПБГУ – наше восстановление; NASA-3 – метод NASA МЛР; NASA-4 – метод NASA МНК.

приведены результаты сопоставлений МКВ-измерений содержания озона с двумя спутниковыми приборами (ACE/FTS и SAGE III) вблизи расположения наземного микроволнового радиометра SOMORA [17]. Отметим, что прибор ACE/FTS также измеряет спектры поглощения солнечного излучения при восходах и заходах Солнца за горизонт планеты, но в ИК области спектра [18].



**Рис. 3.** Профили средних разностей между измерениями содержания озона МКВ радиометром SOMORA и измерениями спутниковых приборов ACE/FTS и SAGE III (СПБГУ).

Из рис. 3 видно, что на высотах 25–30 км измерения обоих спутниковых приборов одинаково хорошо согласуются с наземными МКВ измерениями (средние отличия составляют 8–12%). На высотах более 30 км данные, полученные при обработке измерений прибора SAGE III с помощью версии 3 (СПБГУ), заметно лучше согласуются с наземными измерениями, чем данные, полученные с помощью прибора ACE/FTS.

Подробные сравнения восстановлений профилей озона с помощью измерений различными спутниковыми приборами были выполнены в Центре атмосферных исследований (Колорадо, США). Кратко резюмируя выводы этих исследований, можно отметить, что результаты восстановления СПБГУ хорошо согласуются на высотах 20–60 км (не хуже 10%) с измерениями приборов SAGE II и POAM III, а также удовлетворительно (не хуже 20%) согласуются с результатами измерений прибора HALOE. Однако результаты восстановления по нашему алгоритму существенно отличаются от результатов оперативной обработки НАСА выше 45 км (отличия составляют десятки процентов, достигая 60% на 60 км) и ниже 15 км (до 15% на 10 км). Ниже на рис. 4 приводится пример сопоставления с данными прибора SAGE II [19], который прошел тщательную валидацию.

Из рис. 4 видно, что результаты нашей интерпретации хорошо согласуются с результатами прибора SAGE II, что позволяет использовать их совместно с многолетними данными SAGE II. Результаты оперативной обработки НАСА для этого пригодны в значительно меньшей степени.

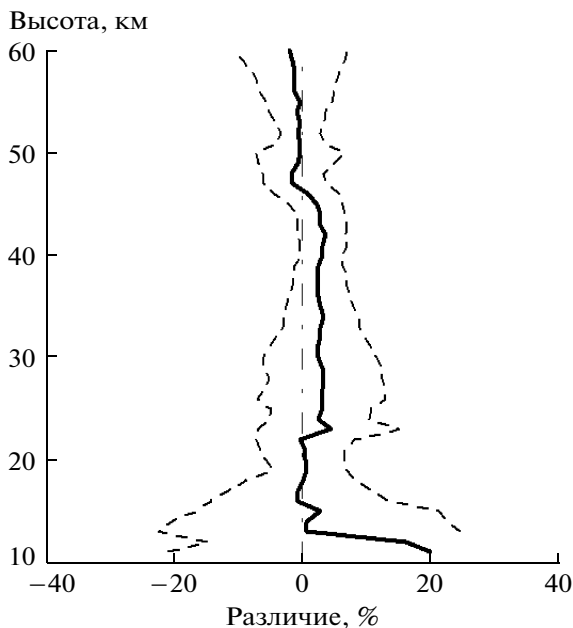


Рис. 4. Средние различия (сплошная линия) и коридор среднеквадратичных различий профилей озона (пунктир) по данным обработки SAGE III СПБГУ и SAGE II.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и протестирована новая версия алгоритма интерпретации многоспектральных измерений прозрачности прибором SAGE III (версия 3). В описанной версии алгоритма используются уточненные спектральные и высотные аппаратные функции, выполняется интегрирование по спектру и по прицельной высоте, учитывается селективность излучения Солнца. На основе решения обратной задачи относительно спектральных характеристик спутникового прибора (с привлечением независимых измерений о содержании озона и двуокси азота и КАО спутникового прибора РОАМ III) в значительной степени исключено влияние засветки в УФ-каналах прибора. Разработанный в СПБГУ алгоритм позволяет получать единый профиль содержания озона от 10 до 90–95 км в отличие от оперативной системы обработки NASA, которая дает отдельно мезосферный профиль и два профиля для стратосферы, полученных двумя независимыми методами.

Сопоставление с результатами оперативной методики NASA показало хорошее взаимное согласие двух методик интерпретации в средней и верхней стратосфере, но систематические различия около 20% на высотах 55–65 км и различия до 50% на больших высотах. Показано, что восстанавливаемые по уточненной версии алгоритма профили озона хорошо согласуются с данными измерений приборов SAGE II и РОАМ III на высотах до 45 км. Высокое качество системы обра-

ботки версии 3 показали также сравнения восстановлений с данными наземного МКВ-зондирования.

Профили озона, NO<sub>2</sub> и аэрозольного ослабления, восстановленные по описанной в этой работе методике интерпретации измерений прозрачности SAGE III за весь период его работы доступны всем желающим, их можно свободно получить в Интернете на персональной страничке автора [http://troll.phys.spbu.ru/Personal\\_pages/Polyakov/sage/sage.html](http://troll.phys.spbu.ru/Personal_pages/Polyakov/sage/sage.html).

Мы благодарим Niklaus Kämpfer (University of Bern) и Dominique Ruffieux (MeteoSwiss) за полезную дискуссию и консультации относительно радиометра SOMORA в Paucigne. Отметим, что использованные в нашей работе данные SAGE III уровней 1b и 2 получены из the NASA Langley Research Center Atmospheric Science Data Center, и благодарим указанную организацию за предоставленные данные и сервис. Благодарим фонд РФФИ и Министерство образования и науки РФ за финансовую поддержку данной работы по грантам 05-05-65305, 06-05-64909, 06-05-64987, РНП.2.1.1.4166 и РНП.2.2.1.1.3836.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кароль И.Л., Розанов В.В., Тимофеев Ю.М. Газовые примеси в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 192 с.
2. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И. Парниковый эффект атмосферы и климат. Итоги науки и техники // Метеорология и климатология. 1984. Т. 12. 262 с.
3. Geller M.A., Smyshlyaev S.P. A Model Study of Total Ozone Evolution 1979–2000 – The Role of Individual Natural and Anthropogenic Effects // GRL. 2002. V. 29. № 22. P. 2048. doi:10.1029/2002GL015689.
4. WMO, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994, World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project Report – WMO, 1995. № 37.
5. Тимофеев Ю.М. Спутниковые методы исследования газового состава атмосферы (Обзор) // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1989. Т. 25. № 5. С. 451–472.
6. Reber C.A. The Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) // GRL. 1993. V. 20. № 8. P. 1215–1218.
7. Поберовский А.В., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М. и др. Определение вертикальных профилей содержания озона методом затменного зондирования с ДОС “МИР”. 1. Описание прибора и методики обработки данных. Примеры результатов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1999. Т. 35. № 3. С. 312–321.
8. Chu W.P., Trepte C.R., Veiga R.E. et al. SAGE III measurements // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. 2002. № 481. P. 457–464.
9. Polyakov A.V., Timofeyev Yu.M., Ionov D.V. et al. Retrieval of ozone and nitrogen dioxide concentration from

- Stratospheric Aerosol and Gas Experiment III (SAGE III) measurement using a new algorithm // JGR. V. 110. P. D06303. doi:10.1029/2004JD005060, 2005.
10. Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Ионоу Д.В. и др. Новая интерпретация измерений прозрачности спутниковым спектрометром SAGE III // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 3. С. 410–422.
  11. SAGE III ATBD Team, SAGE III Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), Solar and Lunar Algorithm LaRC 4750-00-109 version 2.1 26. March 2002 (отчет на сайте [www-sage3.larc.nasa.gov](http://www-sage3.larc.nasa.gov)). 83 p.
  12. DPUG – Data Product User Guide ([www-sage3.larc.nasa.gov](http://www-sage3.larc.nasa.gov)).
  13. Singleton C., Randall C., Chipperfield M. et al. 2002–2003 Arctic Ozone Loss Deduced from POAM III Satellite Observations and the SLIMCAT Chemical Transport Model // Atmos. Chem. Phys. SRef-ID:1680-7324/acp/2005-5-597. 2005. P 597–609.
  14. Kurucz R.L. Synthetic infrared spectra. In Infrared Solar Physics, IAU Symp. 154, 1992 / Eds Rabin D.M., Jefferies J.T. Kluwer, Acad., Norwell: MA. <http://www.meto.umd.edu/~bobe/LBLRTM/>
  15. Ракитин А.В., Косцов В.С., Поляков А.В. Об использовании результатов численного моделирования фотохимических и динамических процессов при корректировке профилей концентрации атмосферных газов, определяемых по измерениям прозрачности атмосферы в спутниковых затменных экспериментах // Исслед. Земли из космоса. (В печати.)
  16. Hocke K., Kämpfer N., Ruffieux D. et al. Comparison and synergy of stratospheric ozone measurements by satellite limb sounders and the ground-based microwave radiometer SOMORA // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2007. № 7. P. 5053–5098.
  17. Calisesi Y., Ruffieux D., Kämpfer N., Viatte P. The Stratospheric Ozone Monitoring Radiometer SOMORA: first validation results // Proceedings of the Sixth European Symposium on Stratospheric Ozone, ed.: European Commission, 2002.
  18. Bernath P.F. et al. 2Atmospheric Chemistry Experiment (ACE): Mission overview // Geophys. Res. Lett. 32, 2005. L15S01, doi:10.1029/2005GL022386.
  19. McCormick M.P. SAGE 2: An overview// Adv. Space Res. 1987. V. 7. № 2. P. 73–86.

## New Improved Algorithm for Interpreting the SAGE III Occultation Measurements

A. V. Polyakov<sup>1</sup>, C. Rendall<sup>2</sup>, L. Harvey<sup>2</sup>, K. Hocke<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*NIIF SPbSU, Saint-Petersburg state university, Saint-Petersburg, Russia*

<sup>2</sup>*University of Colorado, Boulder, USA*

<sup>3</sup>*Institute of Applied Physics, University of Bern, Bern, Switzerland*

This paper is devoted to a description of new improved system for processing the SAGE III data and the analysis of its quality. In the new version, the altitude instrument slit function is taken into account, the stray light in UV channels is estimated and included in the algorithm, that leads to the better agreement between modeled and experiment data. Ozone profiles retrieved using the developed algorithm have been compared with data of the NASA operative processing and independent ground-based and satellite measurements. In distinction from NASA method, the developed algorithm gives a possibility to retrieve the integral ozone profile at altitudes 10–90 km. Ozone profiles retrieved from SAGE II measurements are in good agreement with results of NASA processing that makes it possible to use our results jointly with relevant NASA data.