

К.Г. Грибанов, В.И. Захаров, С.А. Ташкун\*

## ПАКЕТ ПРОГРАММ FIRE-ARMS И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ЗАДАЧАХ ПАССИВНОГО ИК-ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

*Свердловский филиал НИКИЭТ, пос. Заречный, Свердловской обл.**\*Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск*

Поступила в редакцию 26.01.99 г.

Принята к печати 5.02.99 г.

Разработан пакет прикладных программ FIRE-ARMS (Fine Infrared Explorer for Atmospheric Radiation MeasurementS), включающий в себя моделирование радиационных спектров атмосферы, анализ весовых функций и алгоритмы решения обратной задачи пассивного инфракрасного зондирования атмосферы. Представлены результаты применения FIRE-ARMS к инфракрасным спектрам, полученным прибором IMG (Interferometric Monitor for Greenhouse Gases), представляющим собой Фурье-спектрометр, размещенный на борту спутника ADEOS (Advanced Earth Observing Satellite), запущенного Национальным космическим агентством Японии (NASDA) в августе 1996 г. Использование FIRE-ARMS позволило идентифицировать ряд особенностей IMG-спектров, соответствующих изотопическим модификациям молекул  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$ ,  $^{13}\text{CO}_2$  и HDO. В некоторых спектрах, зарегистрированных над пустыней Сахара, обнаружены особенности, относящиеся к аэрозолю  $\text{SiO}_2$ . Показана возможность оценки высоты верхней границы облачности.

**Введение**

С наступлением космической эры начали интенсивно развиваться методы зондирования атмосферы Земли из космоса в инфракрасном (ИК) спектральном диапазоне [1]. Новое поколение ИК-Фурье-спектрометров высокого разрешения орбитального базирования предоставляет новые возможности для измерения параметров системы «земная поверхность – атмосфера». Прибор IMG/ADEOS [2] является первым космическим Фурье-спектрометром с общим спектральным диапазоном 600–3030  $\text{cm}^{-1}$  и достаточно высоким разрешением ( $\sim 0,1 \text{ cm}^{-1}$ ), позволяющим успешно наблюдать вращательную структуру молекулярных полос атмосферных газов. Прибор IMG (Interferometric Monitor for Greenhouse Gases) был разработан Министерством международной торговли и индустрии (Ministry of International Trade and Industry, MITI) Японии и предназначался для глобального картирования распределения парниковых газов.

За 8 мес работы интерферометра IMG накоплено большое количество ИК-спектров. Для восстановления атмосферных профилей температуры, влажности и малых газовых составляющих было также разработано достаточное количество методов [3–6], в основе которых лежат вычислительные алгоритмы решения прямой задачи (т.е. задачи моделирования ИК-спектров по известным профилям температуры и т.д.), а также методы решения обратной задачи, которые, в свою очередь, предполагают наличие достаточно большого объема априорной информации. В настоящей статье представлены пакет программ FIRE-ARMS [7], а также некоторые результаты его применения к анализу спектров IMG.

**Основные характеристики FIRE-ARMS**

Пакет программ FIRE-AEMS позволяет:

– одновременно использовать несколько неперекрывающихся интервалов из диапазона частот 0 – 5000  $\text{cm}^{-1}$ ,

– использовать алгоритмы решения прямой и обратной задач зондирования атмосферы спектрометрами космического, воздушного и наземного базирования (с разрешением лучше 1  $\text{cm}^{-1}$ ) для углов наблюдения в интервале 0–70° (при наблюдении вниз прибор должен «видеть» поверхность Земли),

– восстанавливать температурные профили и профили концентраций атмосферных газов как последовательно, так и одновременно с использованием подходящих спектральных интервалов,

– использовать (по желанию исследователя) регуляризационный подход к решению обратной задачи,

– анализировать весовые функции при выборе оптимальных спектральных интервалов для восстановления и оценки достаточности спектрального разрешения прибора для успешного восстановления того или иного профиля.

**Вычислительные аспекты FIRE-ARMS**

Спектр теплового излучения атмосферы при наблюдении в надир определяется решением уравнения переноса [2]:

$$W(\nu) = \varepsilon(\nu) B(\nu, T_0) \exp\left(-\int_0^H K_{\text{atm}} dh\right) + \int_0^H K_{\text{atm}} B(\nu, T) \exp\left(-\int_h^H K_{\text{atm}} dh'\right) dh. \quad (1)$$

Здесь  $W$  – спектральная плотность энергетической яркости излучения,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{ср})$ ;  $h$  – высота;  $K_{\text{atm}}$  – коэффициент поглощения атмосферных газов, вычисляемый на основе банка данных HITRAN-96 [8] или GEISA [9] с использованием line-by-line суммирования;  $B(\nu, T)$  – функция черного тела;  $\varepsilon(\nu)$  – коэффициент излучения поверхности

Земли;  $T_0$  – температура поверхности Земли;  $H$  – высота верхней границы атмосферы. При вычислении интегралов в (1) FIRE-ARMS использует технику численного интегрирования, предложенную в [10], и адаптивный выбор шага по высоте. Все спектральные вычисления выполняются с высоким разрешением по частоте, а затем производится интегральная свертка вычисленного спектра с заданным пользователем аппаратным контуром спектрального прибора. Встроенный в FIRE-ARMS алгоритм решения обратной задачи в общем случае минимизирует целевую функцию, используемую в [11]:

$$F = \frac{1}{2}(F_1 + F_2), \quad (2)$$

где

$$F_1 = \sum_{i=1}^M \left[ \frac{W_i^{\text{obs}}}{W_i^{\text{calc}}} - \frac{W_i^{\text{calc}}}{W_i^{\text{obs}}} \right]^2;$$

$$W_i^{\text{calc}} \equiv W^{\text{calc}}(T, P, n_\alpha, \nu_i)|_{h=H}; \quad (3)$$

$$F_2 = \mu^T \sum_{j=1}^N \left[ \frac{t_j}{t_j^{\text{ref}}} - \frac{t_j^{\text{ref}}}{t_j} \right]^2 + \mu^P \sum_{j=1}^N \left[ \frac{p_j}{p_j^{\text{ref}}} - \frac{p_j^{\text{ref}}}{p_j} \right]^2 + \sum_{\alpha=1}^{N_{\text{gas}}} \mu^\alpha \sum_{j=1}^N \left[ \frac{n_{\alpha j}}{n_{\alpha j}^{\text{ref}}} - \frac{n_{\alpha j}^{\text{ref}}}{n_{\alpha j}} \right]^2. \quad (4)$$

Здесь варьируемыми параметрами являются  $t_j$ ,  $p_j$ ,  $n_{\alpha j}$  – значения температуры, давления и концентрации газов в  $j$ -м узле высотной сетки;  $F_1$  – обычный функционал метода наименьших квадратов, который должен быть минимизирован для отыскания оптимального набора восстанавливаемых параметров;  $W_i^{\text{obs}}$ ,  $W_i^{\text{calc}}$  – наблюдаемый и вычисленный спектры соответственно;  $M$  – число точек спектра;  $N$  – число точек высотного профиля;  $N_{\text{gas}}$  – число учитываемых атмосферных газов. Стабилизатор решения  $F_2$  зависит как от опорных профилей  $t_j^{\text{ref}}$ ,  $p_j^{\text{ref}}$ ,  $n_j^{\text{ref}}$ , так и от безразмерных параметров регуляризации  $\mu^T$ ,  $\mu^P$ ,  $\mu^1$ , ...,  $\mu^{N_{\text{gas}}}$ . Минимизация (1) производится методом Флетчера – Ривса [12]. Важной особенностью FIRE-ARMS является возможность выбора нескольких спектральных интервалов для восстановления атмосферных профилей на основе анализа весовых функций прямой модели [13].

### Некоторые результаты применения FIRE-ARMS

Восстановление параметров атмосферы проводилось по ИК-спектрам, зарегистрированным прибором IMG/ADEOS в первой половине 1997 г. [14]. На рис. 1 представлен пример восстановления профиля температуры по участку ИК-спектра в интервале 680–765  $\text{cm}^{-1}$ , который соответствует крылу 15-мкм полосы  $\text{CO}_2$ .

Следует отметить, что восстановление только температурного профиля – наиболее простая задача. При оптимальном выборе спектральных интервалов восстановление температурного профиля происходит за 3–5 итераций. Для сплошной облачности восстановление температуры не является корректным, однако позволяет оценить высоту

верхней границы [15]. Этот случай иллюстрирует рис. 2. В отличие от приборов, ведущих съемку земной поверхности в видимом и ближнем ИК-диапазонах, с помощью данной техники можно судить об облачности даже на ночной стороне Земли.

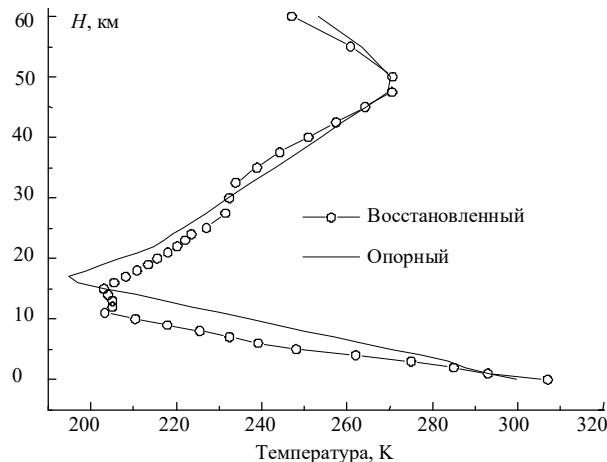


Рис. 1. Пример восстановления профиля температуры в условиях чистого неба

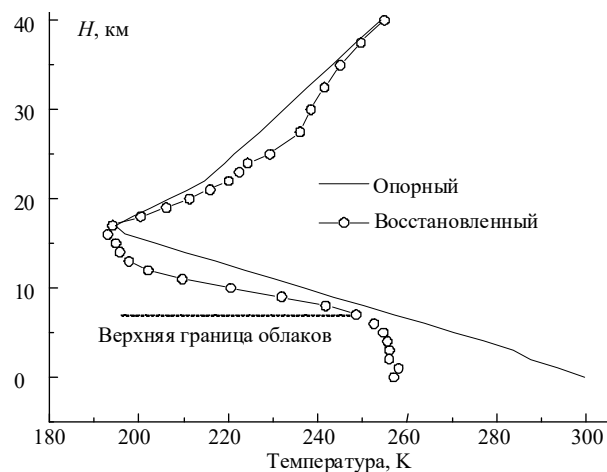


Рис. 2. Восстановление температурного профиля в условиях сплошной облачности. Точка, ниже которой восстановленный профиль перестает изменяться с ростом высоты, соответствует верхней границе облачности

FIRE-ARMS позволяет моделировать спектры с использованием любого набора изотопических модификаций молекул, заданного пользователем (разумеется, содержащихся в банке данных). Это, в свою очередь, дает возможность идентифицировать особенности спектров, соответствующие той или иной молекуле. На рис. 3 показаны примеры идентификации сигналов, соответствующих молекулам  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ ,  $^{13}\text{CO}_2$  и HDO.

В некоторых спектрах, зарегистрированных прибором IMG/ADEOS над пустыней Сахара, был обнаружен широкий пик (рис. 4), имеющий максимум вблизи частоты 1157  $\text{cm}^{-1}$ , который не удалось приписать ни одной молекуле, включенной в банк данных HITRAN-96. Кроме того, спектры атмосферы в данном спектральном диапазоне могут содержать особенности, связанные с аэрозольными составляющими [16], которые позволяют

судить о наличии того или иного типа составляющих в атмосфере. Согласно [17] максимум поглощения вблизи частоты  $1157\text{ см}^{-1}$  имеют такие модификации силикатов ( $\text{SiO}_2$ ), как аморфный кремнезем и  $\alpha$ -кварц. Эти вещества не являются необычными для данного региона. Появление подобного пика в спектре – признак пылевой бури.

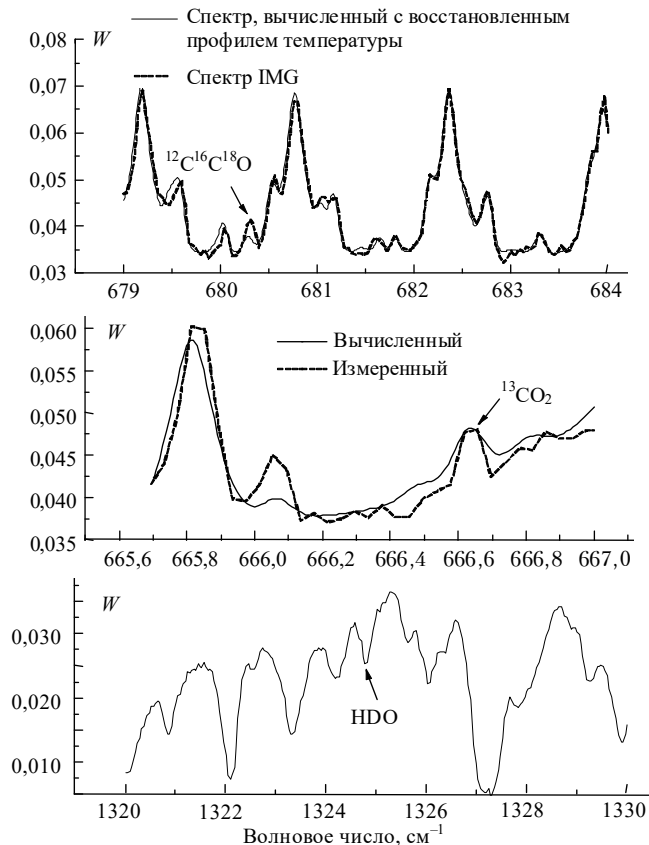


Рис. 3. Идентификация особенности в спектрах IMG, соответствующих различным изотопическим модификациям молекул атмосферных газов

### Выводы

В данной статье на примерах восстановления профилей температуры атмосферы из ИК-спектров, наблюдаемых из космоса с разрешением  $\sim 0,1\text{ см}^{-1}$ , продемонстрирована возможность определения наличия облачности и дана оценка ее верхней границы по характерному излому температурного профиля (см. рис. 2), означающему, что ниже этой границы сплошная облачность воспринимается сенсором IMG как черное тело с поверхностной температурой, соответствующей началу излома профиля. Причем следует отметить, что данный метод определения верхней границы облачности может работать при наблюдении и дневной, и ночной сторон Земли. Показана возможность идентификации сигналов в спектрах IMG/ADEOS от малых атмосферных составляющих, таких как изотопы углекислого газа, воды, а также сигналы от  $\text{SiO}_2$  над Сахарой, вероятно, связанные с пылевыми бурями.

Пакет FIRE-ARMS создавался для обработки данных с Фурье-спектрометров космического, воздушного и наземного базирования со спектральным разрешением лучше  $1\text{ см}^{-1}$ . Обработка спектров, полученных прибором IMG/ADEOS, –

На рис. 4,а представлен весь спектр, а на рис. 4,б – фрагмент спектра вблизи частоты  $1157\text{ см}^{-1}$ . Сплошная линия – наблюдаемый спектр, пунктирная – вычисленный с восстановленным профилем температуры. Периодическая структура линий, наложенная на широкий пик, обусловлена молекулой  $\text{N}_2\text{O}$ .

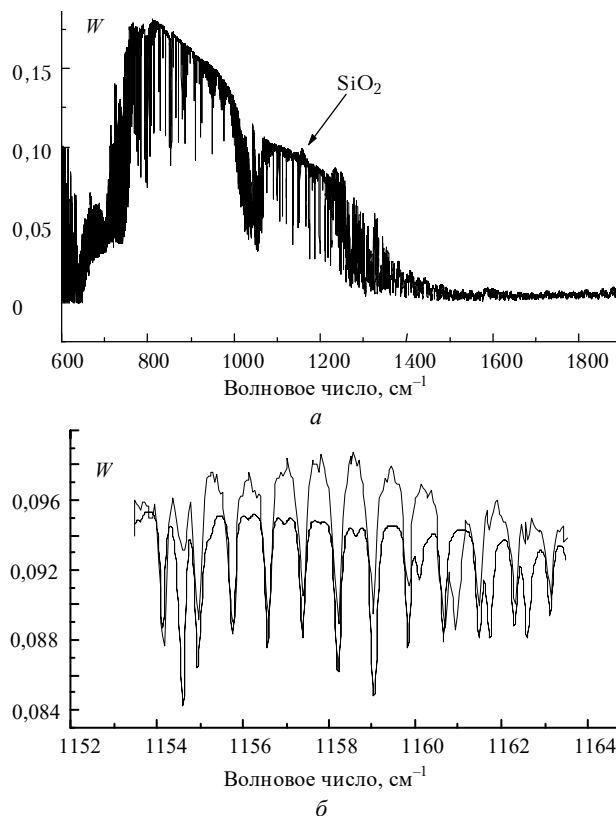


Рис. 4. Спектр IMG/ADEOS, зарегистрированный 16.06.97 в 10:37 UTC над точкой  $21.29^\circ\text{ с.ш.}, 4.33^\circ\text{ в.д.}$

это первое применение FIRE-ARMS, и авторы надеются, что он станет эффективным инструментом для исследователей, работающих в области дистанционного ИК-зондирования атмосферы, в том числе занимающихся проектированием будущих орбитальных комплексов.

Авторы считают приятным долгом выразить благодарность Х. Саджи и его коллегам из ERSDAC (Earth Remote Sensing Data Analysis Center, Япония) за отобранные и предоставленные спектры IMG с сопутствующей информацией, Х. Кобаяши и Д. Шимота из CRIEPI (Central Research Institute of Electrical Power Industry, Япония) за то, что они обратили внимание авторов на дополнительные пики в некоторых спектрах, полученных сенсором IMG над пустыней Сахара, а также В.Ф. Головкин из Института оптики атмосферы СО РАН – за полезные и стимулирующие обсуждения методов решения обратной задачи. Работа одного из авторов (С.А. Ташкун) была поддержана РФФИ (грант 96-07-890007).

Демонстрационную версию FIRE-ARMS можно взять на сервере Интернет по адресу: [www.chat.ru/~atmsci](http://www.chat.ru/~atmsci).

1. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Термическое зондирование атмосферы со спутников. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 410 с.

2. Kobayashi H. IMG program report // The Third ADEOS Symposium/Workshop, January 26-30, 1998, Sendai, Japan.
3. Турчин В.Ф., Козлов В.П., Малкевич М.С. // УФН. 1970. Т. 102. Вып. 3. С. 345–386.
4. Тимофеев Ю.М., Розанов В.В., Поляков А.В. // Метеорология. 1986. N 8. С. 66–73.
5. Smith W.L., Woolf H.M., Revercomb H.E. // Appl. Opt. 1991. V. 30. N 9. P. 1117–1123.
6. Yoshigahara C. // The Second ADEOS Symposium/Workshop, March 10–14, 1997. Yokohama, Japan.
7. Gribanov K.G., Zakharov V.I., Tashkun S.A., Tyuterev V.I. // Proceedings of the 8<sup>th</sup> ASS/FTS International. Workshop. Toulouse, 16–18 Nov. France, 1998.
8. Rothman L.S., Gamache R.P., Tipping R.H., Rinsland C.P., Smith M.A.H., Benner D.C., Malathy Devi V., Flaud J.M., Camy-Peyret C., Perrin A., Goldman A., Massie S.T., Brown L.R., Toth R.A. // JQSRT. 1992. V. 48. N 3–5. P. 469–507.
9. Husson N., Bonnet B., Chedin A., Scott N.A., Chursin A.A., Golovko V.F., Tyuterev V.I. // JQSRT. 1994. V.52. N 3–4. P.425–438.
10. Aoki T. // Papers in Meteorology and Geophysics. 1988. V. 39. N 2. P. 53–58.
11. Tashkun S.A., Golovko V.F., Chursin A.A., Aoki T., Fukabori M., Zakharov V.I., Gribanov K.G. // SPIE. 1998. V. 3583. P. 2–7.
12. Мину М. Математическое программирование. Теория и алгоритмы. М.: Наука, 1990. 488 с.
13. Rogers C.D. // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. N D5. P. 5587–5595.
14. Saji H. et al. // Selected IMG Level 1C products on CD-ROM, ERSDAC, NASDA of Japan. June 1998.
15. Itasu R. // The Third ADEOS Symposium / Workshop, January 26–30, 1998, Sendai, Japan.
16. Кондратьев К.Я. Планета Марс. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 368 с.
17. Плюснина И.И. Инфракрасные спектры минералов. М.: Изд-во МГУ, 1976. 175 с.

**K.G.Gribanov, V.I.Zakharov, S.A.Tashkun. Software Package FIRE-ARMS and its Application for Passive Infrared Sounding of the Atmosphere.**

FIRE-ARMS (Fine Infrared Explorer for Atmospheric Radiation MeasurementS), a software package for radiation atmospheric spectra simulations, weighting function analysis and profiles retrieval from passive infrared sounding of the atmosphere has been developed. Results of IMG (Interferometric Monitor for Greenhouse gases) spectra processing using FIRE-ARMS are presented. IMG is a Fourier spectrometer installed on board of the ADEOS satellite launched in August 1996 by NASDA. With the help of FIRE-ARMS a number of IMG spectra features corresponding to  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ ,  $^{13}\text{CO}_2$  and HDO isotopic species have been identified. The presence of  $\text{SiO}_2$  aerosol above the Sahara desert has also been detected. A possibility of evaluation of an upper bound of clouds is shown.