

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МОНИТОРИНГА ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОВОГО СОСТАВА АТМОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВОЙ АППАРАТУРЫ ИКФС-2

© 2016 г. А. С. Гаркуша\*, А. В. Поляков\*\*, Ю. М. Тимофеев

*Санкт-Петербургский государственный университет*

\*E-mail: saniahome@mail.ru

\*\*E-mail: a.v.polyakov@spbu.ru

Поступила в редакцию 14.09.2015 г.

Исследованы возможности мониторинга общих содержаний различных малых газовых составляющих атмосферы по данным измерений спутникового ИК-Фурье-интерферометра ИКФС-2. На основе прямых (полинейных) расчетов оператора прямой задачи и расчетов матриц ошибок методом статистической регуляризации исследованы возможности для определения общих содержаний таких газов, как  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{HCFC-22}$ ,  $\text{CFC-11}$ ,  $\text{CFC-12}$ ,  $\text{PAN}$  и  $\text{CCl}_4$ . Показано, что прибор ИКФС-2 может быть использован для измерений общих содержаний  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{HNO}_3$ . В режиме накопления информации за счет подавления случайных погрешностей измерений возможно получение данных о содержании  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{HCFC-22}$ ,  $\text{CFC-11}$ ,  $\text{CFC-12}$ ,  $\text{PAN}$  и  $\text{CCl}_4$ .

**Ключевые слова:** малые газовые составляющие атмосферы, дистанционное зондирование атмосферы, Фурье-интерферометрия

**DOI:** 10.7868/S0205961416050055

#### ВВЕДЕНИЕ

Последние десятилетия существенное внимание уделялось созданию специализированной аппаратуры для космического мониторинга газового состава атмосферы и ее использованию (Тимофеев, 1989). Такое внимание обусловлено возрастающим антропогенным влиянием на газовый состав тропосферы и стратосферы и, как следствие, на климат, погоду и состояние окружающей среды (WMO, 2007). В последние годы большое количество информации о газовом составе атмосферы было получено с помощью метода теплового излучения и аппаратуры TES, AIRS, IASI и т.д., реализующих метод для надирной геометрии измерений (Beer et al., 2001; Worden et al., 2004; Crevoisier et al., 2003; Clerbaux et al., 2003, 2009). В России создан современный спутниковый Фурье-спектрометр (ИКФС-2 (Завелевич и др., 2009)), предназначенный, прежде всего, для температурно-влажностного зондирования атмосферы, а также для получения информации о температуре подстилающей поверхности, содержании озона и ряда парниковых газов. Первые рассмотрения информационные возможности прибора и его точностных характеристик содержатся в работах (Поляков и др., 2009, 2010). Опыт использования спутникового Фурье-спектрометра IASI показал, что измере-

ния спектров уходящего теплового излучения с относительно высоким спектральным разрешением и низким уровнем случайных шумов позволяют обнаружить и определить содержание многих важных атмосферных газов (Clerbaux et al., 2003, 2009). Знание соответствующих характеристик прибора ИКФС-2 позволяет оценить его возможности в спутниковых экспериментах (Завелевич и др., 2009).

В данной работе продолжены исследования возможностей прибора в области мониторинга содержаний атмосферных газов, имеющих полосы излучения в спектральной области измерений прибора.

#### МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА

На первом этапе исследований, чтобы ограничить список анализируемых атмосферных газов (а их десятки), были проведены сравнения расчетов вариаций уходящего теплового излучения, обусловленных вариациями содержания газов, со случайным шумом измерений прибора. Расчеты интенсивности уходящего излучения и его вариационных производных относительно содержания различных газов осуществлялись с помощью широко известной программы прямого расчета LBLRTM (Line-by-Line Radiative Transfer Model

(Clough et al., 2005)). Исходные ансамбли состояний атмосферы (вертикальные профили температуры, влажности, содержания газов) были сформированы по данным моделирования численной модели WACCM4 (The Whole Atmosphere Community Climate Model) (Marsh et al., 2013) ([http://www.cesm.ucar.edu/working\\_groups/WACCM/](http://www.cesm.ucar.edu/working_groups/WACCM/)) и содержали 492 реализации профилей для средних широт Северного полушария. Предполагалось, что спутниковые измерения проводятся в условиях безоблачной атмосферы.

Были проведены расчеты уходящего теплового излучения с учетом и без учета содержания следующих малых газовых составляющих (МГС):  $O_3$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$ ,  $C_2H_4$ ,  $CH_3OH$ ,  $HCOOH$ ,  $HNO_3$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ , CFC-11, CFC-12, HCFC-22, PAN,  $CCl_4$ . Сравнение этих вариаций со случайными погрешностями измерений аппаратуры ИКФС-2 позволило исключить из рассмотрения ряд газов, вклад которых в формирование уходящего излучения мал по сравнению с этими погрешностями.

На втором этапе исследований были рассчитаны погрешности определения вертикальных профилей содержания отобранных МГС для линеаризованной формы уравнения переноса теплового излучения (Турчин и др., 1970; Rodgers, 2000). При расчете остаточной ковариационной матрицы (матрицы ошибок) учитывались изменчивость профили водяного пара и температуры (их погрешности определены). Предполагалось, что все эти три вектора (исследуемый газ, температура и водяной пар) восстанавливаются одновременно. Расчеты проводились для всего спектрального интервала  $660-2000 \text{ см}^{-1}$  (2701 канал измерений прибора ИКФС-2). Остаточная ковариационная матрица (матрица ошибок) вычислялась по формуле (Турчин и др., 1970; Rodgers, 2000)

$$\tilde{D} = (A' \Sigma^{-1} A + D^{-1})^{-1},$$

где  $D = \begin{bmatrix} D_q & 0 & 0 \\ 0 & D_{H_2O} & 0 \\ 0 & 0 & D_T \end{bmatrix}$  – ковариационная матрица

восстанавливаемых параметров;  $D_q$  – ковариационная матрица исследуемого газа;  $D_T$  и  $D_{H_2O}$  – ковариационные матрицы температуры и профиля водяного пара (корреляции между различными восстанавливаемыми параметрами не учитывались);  $\Sigma$  – ковариационная матрица погрешностей измерений (соответствующие априорные ковариационные матрицы были рассчитаны по данным численной модели WACCM4 (Marsh et al., 2013));  $A = [A_q \ A_{H_2O} \ A_T]$  – оператор прямой задачи. Погрешность восстановления общего содержания (ОС) исследуемого газа вычислялась по формуле

$$\delta = w^T \tilde{D}_q w,$$

где  $w$  – вектор весовых коэффициентов (квадратуры расчета общего содержания газа),  $\tilde{D}_q$  – часть остаточной ковариационной матрицы, соответствующая исследуемой газовой компоненте.

Помимо значений погрешностей определения ОС газов, представляет интерес число степеней свободы полезного сигнала относительно данного газа, содержащихся в спектральных измерениях (Rodgers, 2000)  $d_s$ . Эту величину можно трактовать как число независимых параметров, которые можно выделить в профиле содержания газа на основе рассматриваемых измерений, или, иными словами, как число слоев атмосферы, среднее содержание газа в каждом из которых может быть определено. В частности, если эта величина близка к единице, может быть получено только общее содержание, если близка двум, то (в несколько упрощенном понимании) могут быть получены величины содержания в двух слоях, например, в стратосфере и тропосфере и т.д.

Для расчета числа степеней свободы мы использовали формулу (Rodgers, 2000)

$$d_s = \text{tr}(H),$$

где  $H = RA$  – усредняющее ядро;  $R = (A' \Sigma^{-1} A + D^{-1})^{-1} A' \Sigma^{-1}$  – решающий оператор, в нашем случае, метода статистической регуляризации.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В таблице указаны название газовой компоненты, априорная относительная изменчивость общего содержания газа (выраженная в процентах), относительная погрешность определения общего содержания с помощью прибора ИКФС-2 и число степеней свободы сигнала.

Как следует из приведенных данных, имеется пять газовых компонент ( $O_3$ ,  $CO_2$ ,  $N_2O$ ,  $CH_4$ ,  $HNO_3$ ), число степеней свободы сигнала для которых равно или превышает единицу. Таким образом, для этих пяти газов прибор ИКФС-2 позволяет определять общие содержания. Для озона имеются возможности определять три параметра его вертикального распределения, например, содержание в трех слоях. Для других шести газов индивидуальные измерения спектров уходящего теплового излучения не позволяют определять их ОС (число степеней свободы менее единицы), однако такие возможности имеются при использовании многократных измерений над определенными территориями – за счет подавления случайных погрешностей измерений.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Проведены численные исследования возможностей спутникового прибора ИКФС-2 для определения содержания ряда МГС. Расчеты уходя-

## Информативность измерений атмосферных газов

Газ	Относительная изменчивость общего содержания, %		Число степеней свободы, $ds$
	априорная	апостериорная (погрешность)	
O <sub>3</sub>	15.0	0.6	3.2
CO <sub>2</sub>	5.8	0.5	1.1
N <sub>2</sub> O	3.0	0.9	1.0
CH <sub>4</sub>	3.9	1.1	1.0
HNO <sub>3</sub>	19.4	7.7	1.0
CH <sub>3</sub> OH	73.8	53.6	0.5
HCFC-22	48.3	17.9	0.9
CFC-11	13.2	4.5	0.9
CFC-12	15.5	4.2	0.9
PAN	27.8	19.1	0.7
CCl <sub>4</sub>	13.3	9.6	0.5

шего излучения, его вариаций, вариационных производных по содержанию МГС, погрешностей восстановления общих содержаний и числа независимых параметров, определяемых из измерений спектров уходящего излучения, показали, что:

а) прибор ИКФС-2 может позволить определять общие содержания O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> и HNO<sub>3</sub>. Их относительные погрешности варьируются от 0.5 до 7.7%;

б) имеются возможности определять три параметра вертикального распределения содержания озона;

в) при усреднении измерений спектров уходящего излучения для определенных территорий наблюдений имеются потенциальные возможности определения общих содержаний CH<sub>3</sub>OH, HCFC-22, CFC-11, CFC-12, PAN, CCl<sub>4</sub>.

Расчеты и анализ информативности и погрешностей определения газов с помощью прибора ИКФС-2 выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-17-00096).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Десятов А.В. Технологический образец бортового инфракрасного Фурье-спектрометра ИКФС-2 для температурного и влажностного зондирования атмосферы Земли // Совр. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2009. Т. 1. С. 259–267.

Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б. Температурно-влажностное зондирование атмосферы по данным спутникового ИК-зондировщика высокого спек-

трального разрешения ИКФС-2 // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 5. С. 3–10.

Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б. Возможности определения содержания озона и малых газовых составляющих по данным спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения (ИКФС-2) // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 3. С. 3–11.

Тимофеев Ю.М. Спутниковые методы исследований газового состава атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1989. Т. 25. № 5. С. 451–472.

Турчин В.Ф., Козлов В.П., Малкевич М.С. Использование методов математической статистики для решения некорректных задач // УФН. 1970. Т. 102. № 3. С. 345–386.

Beer R., Thomas A.G., David M.R. Tropospheric emission spectrometer for the Earth Observing System's Aura satellite // Appl. Opt. 2001. V. 40. № 15. P. 2356–2367.

Clerbaux C., Boynard A., Clarisse L. et al. Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder // Atm. Chem. Phys. 2009. № 9. P. 6041–6054.

Clerbaux C., Hadji-Lazaro J., Turquety S. et al. Trace gas measurements from infrared satellite for chemistry and climate applications // Atm. Chem. Phys. 2003. № 3. P. 1495–1508.

Clough S.A., Shephard M.W., Mlawer E.J., Delamere J.S., Iacono M., Cady-Pereira K., Boukabara S., Brown P.D. Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes, Short Communication // J. Quant. Spectr. Radiat. Transf. 2005. № 91. P. 233–244.

Crevoisier C., Chedin A., Scott N.A. AIRS channel selection for CO<sub>2</sub> and other trace-gas retrievals // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2003. № 129. P. 2719–2740.

Marsh D.R., Mills M.J., Kinnison D.E., Lamarque J.-F., Calvo N., Polvani L.M. Climate change from 1850 to 2005

simulated in CESM1(WACCM), 73727391 // J. Clim. № 26(19), 2013. doi 10.1175/JCLI-D-12-00558.1

Rodgers C.D. Inverse methods for atmospheric sounding. Theory and practice. Ser. Atm., Oc. and Planet. Phys. V. 2. Singapore—New Jersey—L.—Hong-Kong: World Scientific, 2000. 238 p.

WMO (World Meteorological Organization). Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006. Global Ozone Re-

search and Monitoring Project. Rep. № 50. Geneva, Switzerland, 2007.

Worden J., Kulawik S.S., Shephard M.W., Clough S.A., Worden H., Bowman K., Goldman A. Predicted errors of tropospheric emission spectrometer nadir retrievals from spectral window selection // J. Geophys. Res.2004. V. 109. № D09. P. 308. 1–12. doi 10.1029/2004JD004522

## **Analysis of Satellite Instrument IRFS-2 Availabilities for Monitoring the Atmospheric Gaseous Composition**

**A. S. Garkusha, A. V. Polyakov, Yu. M. Timofeyev**

*Saint-Petersburg State University*

Availabilities of the total column monitoring of different minor gaseous of the atmosphere with satellite Fourier interferometer IRFS-2 have been studied. The possibilities to obtain the CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>3</sub>OH, HCFC-22, CFC-11, CFC-12, PAN & CCl<sub>4</sub> total columns have been analyzed on the basis of direct (line-by-line) calculations of the forward problem operator and calculations of error matrices by statistical regularization method. It is shown that the IRFS-2 device can be used to measure total columns of CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> and HNO<sub>3</sub>. In the information gathering mode due to the suppression of random measurement errors, it is possible to retrieve the CH<sub>3</sub>OH, HCFC-22, CFC-11, CFC-12, PAN & CCl<sub>4</sub> total columns.

**Keywords:** trace gases, remote sensing of atmosphere, Fourier interferometry, composition of atmosphere