
**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

**СРАВНЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
СОДЕРЖАНИЯ ФТОРИСТОГО ВОДОРОДА В АТМОСФЕРЕ**

© 2012 г. А. В. Поляков^{1*}, Ю. М. Тимофеев¹, К. А. Walker²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Физический факультет, С-Петербург

²University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada

*E-mail: polyakov@troll.phys.spbu.ru

Поступила в редакцию 19.12.2011 г.

Анализируются и сравниваются результаты спутниковых и наземных измерений общего содержания (ОС) фтористого водорода (HF). Из измерений профиля HF прибором FTS на спутнике ACE рассчитывается ОС и сопоставляется с данными наземных измерений вблизи Санкт-Петербурга в 2009–2011 гг. Сравнения показали хорошее качественное согласие сезонного хода ОС HF по данным двух независимых измерений. Немногочисленные (девять случаев) прямые сравнения данных двух типов измерений, согласованных по времени (в течение суток) и месту (не далее 500 км), показали следующие характеристики: средняя разность 8% с превышением спутниковых данных, стандартное отклонение разности 7%. В двух случаях близких пар измерений (ближе 200 км) сопоставления показали разности 1 и 7%. Полученные статистические характеристики разностей двух типов измерений хорошо согласуются с независимыми данными сопоставлений измерений ОС HF по данным ACE-FTS с данными сети NDACC.

Ключевые слова: Фурье-интерферометр, общее содержание, фтористый водород, валидация спутниковых данных, наземные измерения общего содержания

ВВЕДЕНИЕ

Влияние газового состава на радиационные характеристики атмосферы, погоду и климат Земли, а также состояние озоносферы рассмотрено в ходе многочисленных спутниковых программ по изучению газового и аэрозольного состава атмосферы различными методами (Тимофеев, 1989; WMO, 2003). В последнее десятилетие одним из важнейших таких экспериментов является эксперимент ACE (Atmospheric Chemistry Experiment) с ИК-Фурье спектрометром ACE-FTS (Bernath, 2005). Прибор измеряет спектры прямого солнечного излучения при восходах и заходах Солнца с высоким спектральным разрешением (0.02 см^{-1}) в области $750\text{--}4400 \text{ см}^{-1}$, что позволяет определять вертикальные профили содержания более 30 газов (Mahieu et al., 2008). Важным этапом спутниковых измерений является их валидация с помощью независимых, в том числе наземных, измерений. Такие программы валидации данных ACE-FTS описаны, например, в публикациях специальных выпусков журналов *Geophysical Research Letters* (Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. № L15S01) и *Atmospheric Chemistry and Physics* (Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2008. V. 8).

С января 2009 г. в Санкт-Петербургском государственном университете (СПбГУ) на кафедре физики атмосферы физического факультета (в

Петергофе в 28 км к западу от центра Санкт-Петербурга (59.88° с.ш., 29.82° в.д.)) проводятся наземные измерения спектров прямого солнечного излучения в ИК-области спектра измерительным спектральным комплексом на основе Фурье-спектрометра высокого спектрального разрешения Bruker IFS-125HR (Поберовский, 2010). Эти измерения позволяют определять общие содержания ряда важных климатически активных газов (Поберовский и др., 2010а). Эти же измерения используются для валидации результатов различных спутниковых экспериментов. В данной работе приведены результаты сравнений спутниковых и наземных измерений общего содержания (ОС) фтористого водорода (HF).

СПУТНИКОВЫЕ И НАЗЕМНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Солнечная затменная геометрия наблюдений прибора ACE-FTS позволяет проводить около 30 измерений спектров солнечного излучения в сутки. Спектры измерялись в диапазоне прицельных высот от 150 км до верхней границы облаков с вертикальным разрешением 3–4 км. Для различной геометрии шаг измерений по высоте составлял от 1.5 до 6 км. На первом этапе интерпретации измерений определялись вертикальные профили температуры и давления с помощью анализа по-

глошения в линиях CO_2 . В дальнейшем анализировалось поглощение в специально выбранных для каждого газа “спектральных окнах”. Эти окна выбраны с целью минимизации влияния “мешающих” газов для высот от нижней мезосферы до верхней тропосферы. В результате анализа последовательных измерений солнечных спектров при разных прицельных высотах определены вертикальные профили отношений смеси исследуемого газа, которые интерполированы на высотную сетку с шагом 1 км. При анализе измерений использовалась информация о параметрах тонкой структуры молекулярного поглощения широко известного банка данных HITRAN. Для определения ОС HF выделены 13 спектральных окон в диапазоне $1815\text{--}4143\text{ см}^{-1}$ (Batchelor et al., 2009). Подчеркнем, что затменный тип спутниковых измерений характеризуется относительно малым числом измерений в сутки и медленным изменением широты измерений. Сами измерения прибором ACE-FTS осуществляются в тропических, средних и полярных широтах.

Анализ первых результатов наземных измерений содержания HF в России содержится в статьях (Поберовский и др., 2010б; Поляков и др., 2011). В частности в статье (Поляков и др., 2011) приведены предварительные результаты сравнений спутниковых и наземных измерений в период апрель 2009 г.—апрель 2010 г. В настоящей работе использованы наземные измерения с апреля 2009 г. по октябрь 2011 г.

Наземные измеренные спектры Солнца имели спектральное разрешение около 0.005 см^{-1} , отношение сигнал/шум, определенное по шумовой дорожке “нулевого” сигнала, колебалось в пределах $400\text{--}1600$, типичное значение около 1200. Для интерпретации измерений применялась программа SFIT2, используемая на станциях сети NDACC.

Для определения ОС HF использовался спектральный интервал $4038.0\text{--}4039.7\text{ см}^{-1}$. Укажем также, что при интерпретации наземных измерений использовались данные о профиле температуры в атмосфере и (в качестве начального приближения) о профиле отношения смеси водяного пара (“мешающего газа”) из данных уровня 3 измерений спутника Aqua (приборы AIRS и AMSU_A) http://airs.jpl.nasa.gov/data_products/data_products_toc/. Наши оценки случайной компоненты погрешности определения ОС на основе изменчивости ОС в периоды стабильных состояния атмосферы и функционирования прибора позволяют оценить ее величину в $1\text{--}2\%$. Отметим, что исследование различных источников погрешностей определения ОС HF было осуществлено в работе (Schneider, Blumenstock, 2004). По оценкам этой работы, случайная компонента погрешностей измерений ОС (при близких значе-

ниях сигнал/шум) составляет 2.7% , а основной вклад в систематическую погрешность вносит погрешность задания интенсивности линии HF (4.3%). Аналогичные оценки в работе (Senten et al., 2008) дали общую случайную компоненту погрешности в 6% и систематическую погрешность в $\sim 5\%$ (в основном за счет погрешностей задания интенсивности линии поглощения HF). Отметим, что небольшие вариации оценок погрешностей в различных работах обусловлены различными используемыми спектральными интервалами, отличиями в характеристиках аппаратуры, условиях измерений (зенитные углы Солнца и т.д.) и в состоянии атмосферы в моменты измерений.

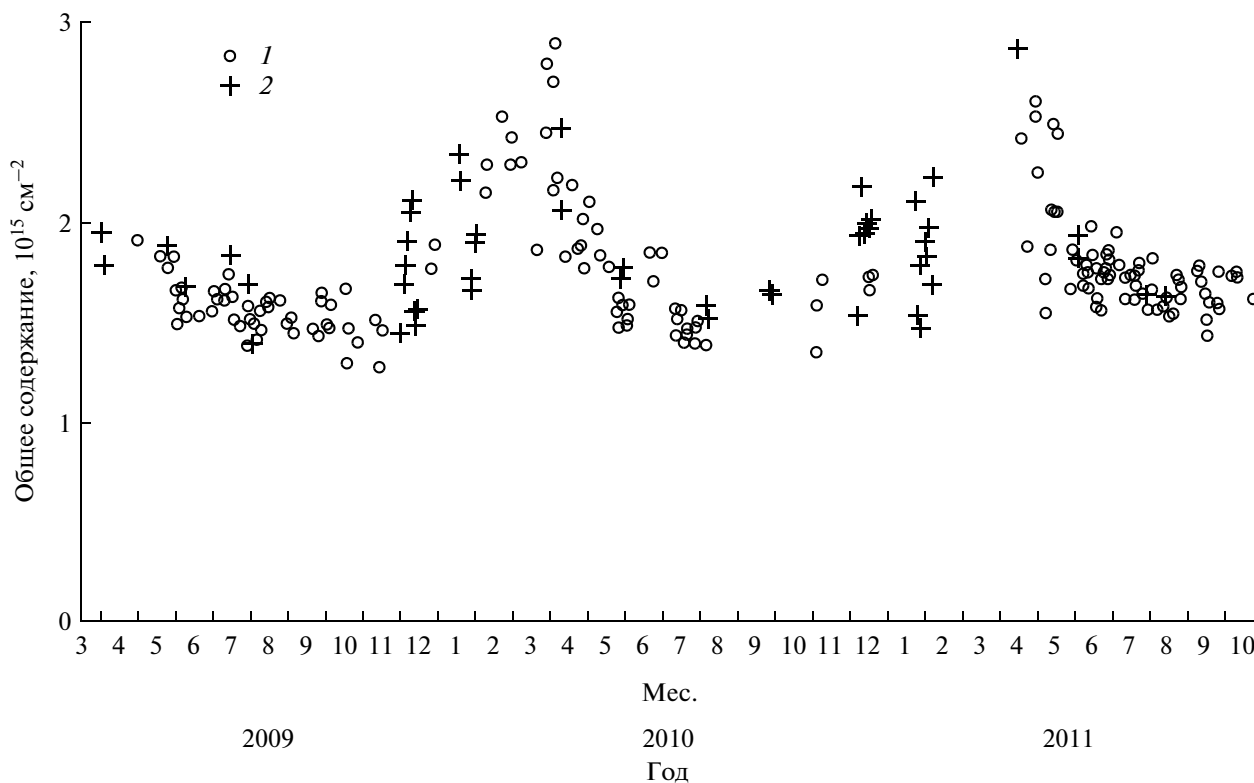
РЕЗУЛЬТАТЫ СОПОСТАВЛЕНИЙ

На рисунке показаны среднесуточные значения ОС HF по результатам наземных измерений и значения, полученные интегрированием вертикальных профилей по данным ACE-FTS версии 2.2, измеренных в круге радиусом 500 км с центром в Петергофе. Отметим, что совпадений измерений двух приборов в течение одного дня очень мало (9), поэтому рисунок демонстрирует результаты, полученные двумя приборами в разное время, и позволяет только оценить сходство временных зависимостей результатов двух методов наблюдений. Приведенный рисунок показывает хорошее качественное и количественное согласие измерений. Оба прибора демонстрируют сходные по величине и продолжительности минимумы (летнее-осенние периоды) и максимумы (зимне-весенний периоды) ОС HF и увеличение вариаций содержания HF в зимне-весенние периоды.

Ниже, анализируя количественные характеристики сравнения двух типов измерений, мы будем рассматривать разности их результатов, вычитая из данных спутниковых измерений данные наземных измерений, и различные статистические характеристики этих разностей. Говоря об относительной разности, мы будем иметь в виду отношение разности к данным наземных измерений. Чтобы избежать возможных неоднозначностей, явно укажем используемые характеристики самих значений и их разностей. Мы рассмотрим: \bar{x} — выборочные средние, $\sqrt{\bar{x}^2}$ — среднеквадратичные величины, и σ_x — среднеквадратичные отклонения (СКО, стандартные отклонения) случайной величины x , представленной выборочными значениями $\{x_i\}_{i=1,n}$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1,n} x_i, \quad \sqrt{\bar{x}^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1,n} x_i^2},$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1,n} (x_i - \bar{x})^2}.$$



Результаты измерений ОС HF за период апрель 2009 г.—октябрь 2011 г.: 1 — наземные измерения в Петергофе; 2 — спутниковые измерения ACE-FTS. Расстояние не более 500 км.

Общие количественные характеристики результатов сравнений приведены в таблице.

Согласно данным таблицы, сравнения спутниковых и наземных измерений содержания HF в Петергофе показывают следующее: средние разности между двумя типами измерений составляют 8% для обоих критериев рассогласований (500 и 1000 км) (при этом наземные измерения дают меньшие значения ОС HF); среднеквадратичные разности составляют для рассогласования в 500 км 11%, а для рассогласований 1000 км — 15%; СКО разностей — 7% и 13% соответственно.

При сопоставлении наземных и спутниковых измерений содержания HF заметное влияние оказывает расстояние между двумя типами измерений. При большом рассогласовании (до 1000 км) среднеквадратичные разности близки к СКО содержания HF (естественным вариациям) за исследованный период (16%).

В двух случаях сопоставлений (при расстоянии менее 200 км между двумя типами измерений) разности составляли 1% и 7%.

Валидация данных измерений содержания HF по версии v2.2 была осуществлена ранее при сравнениях со спутниковыми данными прибора HALOE, аэро-

Статистические характеристики результатов спутниковых и наземных измерений ОС HF и их разностей

Расстояние, км	500	1000
Число сравнений	9	43
Средние СПБГУ, $\text{мол}/\text{см}^2$	1.62×10^{15}	1.70×10^{15}
Средние ACE-FTS	1.75×10^{15}	1.84×10^{15}
СКО ОС HF по данным СПБГУ, %	16	16
СКО ОС HF по данным ACE-FTS, %	8	13
Средние относительные разности, %	То же	8
Среднеквадратические относительные разности, %	11	15
Относительные СКО (стандартное отклонение) разности, %	7	13

статными измерениями (приборы FIRS-2 и Mark-IV) и измерениями Фурье-спектрометрами на наземных станциях сети NDACC (шесть станций) (Mahieu et al., 2008). При сравнениях использовались два критерия пространственного согласования измерений – 1000 и 500 км (за исключением тропической станции Reunion Island, для которой это согласования было 1200 км). Временное согласование составляло +/- 24 ч.

Средние разности для различных станций составляли 6.54–13.9%, стандартные отклонения 7.42–10.88%. При анализе сопоставлений всех наземных станций и использовании указанных выше критериев средняя относительная разность составляла 7.4%, стандартное отклонение 11.4%. При ужесточении критерия пространственного рассогласования до 200 км по широте средняя относительная разность уменьшилась до 2.8%, а стандартное отклонение и стандартная ошибка до 8.7%.

Сравнения в работе (Batchelor et al., 2009) обнаружили значительные средние и среднеквадратические разности между измерениями в 2007 г. (средние – 10.57%, среднеквадратические – 15.11%). В 2008 г. эти же величины составляли 3.41 и 14.37% соответственно. В случае использования более жестких критериев пространственно-временного согласования спутниковых и наземных измерений средние разности заметно уменьшились – для измерений 2007 г. до 5.23%, для 2008 г. до 1.14%, – хотя среднеквадратические разности оставались довольно значительными, 8.88% и 16.81% соответственно.

Приведенные величины разностей между спутниковыми и наземными измерениями содержания HF в Петергофе в общем хорошо согласуются с более ранними сопоставлениями (Mahieu et al., 2008; Batchelor et al., 2009). С учетом погрешностей двух типов измерений и пространственно-временными вариациями содержания HF, можно утверждать, что общее содержание HF измеряется прибором ACE-FTS с погрешностями ~5–10%.

ВЫВОДЫ

Наблюдается хорошее согласие сезонного хода результатов наземных и спутниковых измерений. Оба метода демонстрируют сходные сезонные колебания ОС HF и увеличение его изменчивости в зимне-весенний период. Количественные сопоставления показали, что, с учетом погрешностей двух типов измерений и пространственно-временных вариаций содержания HF, общее содержание HF измеряется прибором ACE-FTS с погрешностями не хуже 5–10%.

В работе использованы измерения спутникового эксперимента The Atmospheric Chemistry Experiment (ACE), поддержанного Космическим

агентством Канады и Национальным Центром научных и инженерных исследований Канады.

Работа выполнена при поддержке ФЦП Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (госконтракты № П969 от 27.05.2010 и № 16.740.11.0048) и НИР СПбГУ № 11.31.547.2010 и 11.37.28.2011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Поберовский А.В. Наземные измерения ИК-спектров солнечного излучения с высоким спектральным разрешением // *Оптика атмосферы и океана*. 2010. Т. 23. № 1. С. 56–58.

Поберовский А.В., Макарова М.В., Ракитин А.В., Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М. Изменчивость общих содержаний климатически активных газов по наземным спектроскопическим измерениям с высоким разрешением // *Докл. РАН*. 2010а. Т. 432. № 2. С. 257–259.

Поберовский А.В., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М. Измерения содержания фтористого водорода в атмосфере вблизи Санкт-Петербурга // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2010б. № 2. С. 286–288.

Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Ягочкина И.С. Сезонные вариации общего содержания фтористого водорода в атмосфере // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2011. Т. 47. № 4. С. 521–532.

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

Bernath P.F., McElroy C.T., Abrams M.C., Boone C.D., Butler M., Camy-Peyret C., Carleer M., Clerbaux C., Coheur P.F., Colin R., DeCola P., DeMazière M., Drummond J.R., Dufour D., Evans W.F.J., Fast H., Fussen D., Gilbert K., Jennings D.E., Llewellyn E.J., Lowe R.P., Mahieu E., McConnell J.C., McHugh M., McLeod S.D., Michaud R., Midwinter C., Nassar R., Nichitiu F., Nowlan C., Rinsland C.P., Rochon Y.J., Rowlands N., Semeniuk K., Simon P., Skelton R., Sloan J.J., Soucy M.-A., Strong K., Tremblay P., Turnbull D., Walker K.A., Walkty I., Wardle D.A., Wehrle V., Zander R., Zou J. Atmospheric Chemistry Experiment (ACE): mission overview // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. № L15S01. doi:10.1029/2005GL022386.

Batchelor R.L., Kolonjari F., Lindenmaier R., Mittermeier R.L., Daffer W., Fast H., Manney G., Strong K., Walker K.A. Four Fourier transform spectrometers and the Arctic polar vortex: instrument intercomparison and ACE-FTS validation at Eureka during the IPY springs of 2007 and 2008 // *Atm. Meas. Tech. Discuss.* 2009. V. 2. № 6. P. 2881–2917.

Mahieu E., Duchatelet P., Demoulin P., Walker K.A., Dupuy E., Froidevaux L., Randall C., Catoire V., Strong K., Boone C.D., Bernath P.F., Blavier J.-F., Blumenstock T., Coffey M., Mazière M., De, Griffith D., Hannigan J., Hase F., Jones N., Jucks K.W., Kagawa A., Kasai Y., Mebarki Y., Mikuteit S., Nassar R., Notholt J., Rinsland C.P., Robert C., Schrems O., Senten C., Smale D., Taylor J., Tétard C., Toon G.C., Warneke T., Wood S.W., Zander R., Servais C. Validation of ACE-FTS v2.2 measurements of Cl, HF, CCl₃F and CCl₂F₂ using space-, balloon- and ground-based instrument observation // *Atm. Chem. Phys.* 2008. V. 8. P. 6199–6221.

Schneider M., Blumenstock T. Subtropical trace gas profiles determined by ground-based FTIR spectroscopy at Izana (28°N, 16°W): Five-year record, error analysis, and comparison with 3-D CTMs // *Atm. Chem. Phys. Discuss.* 2004. V. 4. P. 5261–5301.

Senten C., De Mazière M., Dils B., Hermans C., Kruglanski M., Neefs E., Scolas F., Vandaele A.C., Vanhaelewyn G., Vigouroux C., Carleer M., Coheur P.F., Fally S., Barret B., Baray J.L., Delmas R., Leveau J., Metzger J.M., Mahieu E., Boone C., Walker K.A., Bernath P.F., Strong K. Technical Note: New

ground-based FTIR measurements at Ile de La Reunion: observations, error analysis, and comparisons with independent data // *Atm. Chem. Phys.* 2008. V. 8. P. 3483–3508.

WMO, The role of satellites in WMO programmes in the 2010s // *Techn. Doc. WMO/TD.* 2003. № 117. P. 127.

Доступ к данным спутникового зондирования AQUA http://airs.jpl.nasa.gov/data_products/data_products_toc/

Comparisons of Satellite and Ground-Based Measurements of Hydrogen Fluoride Total Content in Earth Atmosphere

A. V. Polyakov, Yu. M. Timofeyev, K. A. Walker

Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg

Results of satellite and ground-based measurements of the hydrogen fluoride (HF) total content (TC) were analyzed and compared. HF TCs were calculated from HF profiles measured by FTS device onboard ACE satellite and compared with data of ground-based measurements near Saint-Petersburg during 2009–2011. The comparisons have shown that HF TO seasonal behaviors from data of two independent measurements are in good qualitative agreement. Few (nine events) direct comparisons of data of two types of measurements, collocated in time (during twenty-four hours) and place (within 500 km), have shown the following: the mean difference is 8% (with exceeding of satellite data), the difference standard deviation is 7%. In two cases of close pairs of measurements (within 200 km), the comparisons gave differences equals to 1 and 7%. Received statistical characteristics of differences of two types of measurements are in good agreement with independent data of comparisons of HF TC from ACE-FTS measurements and data of NDACC network.

Keywords: Fourier-interferometer, total content, hydrogen fluoride, validation of satellite data, ground-based measurements of total content