

УДК 551.510.42:551.510.411.33

## СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ФТОРИСТОГО ВОДОРОДА В АТМОСФЕРЕ

© 2011 г. А. В. Поляков, Ю. М. Тимофеев, А. В. Поберовский, И. С. Яговкина

*Санкт-Петербургский государственный университет  
198504 Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская, 1  
E-mail: polyakov@troll.phys.spbu.ru; avrob@troll.phys.spbu.ru  
Поступила в редакцию 01.09.2010 г., после доработки 17.03.2011 г.*

Приведены результаты наземных измерений общего содержания (ОС) фтористого водорода в атмосфере в Петергофе вблизи Санкт-Петербурга в течение года с апреля 2009 по апрель 2010 гг. с помощью Фурье-спектрометра Bruker IFS125 с высоким спектральным разрешением ( $0.005 \text{ см}^{-1}$ ). Для обращения радиационных данных использовался известный компьютерный код SFIT-2 (Zephyr-2). Случайные погрешности измерений составили 1–5%, а систематическая погрешность 5–10%. Сезонный ход ОС HF в Петергофе характеризуется наличием минимума ОС HF летом и максимума зимой – ранней весной и очень близок к полученному на станции NDACC Harestua, расположенной примерно на той же широте. Сопоставление наземных измерений СПбГУ с данными спутниковых измерений ОС HF (прибор ACE-FTS) показало хорошее количественное согласие результатов для всего периода наблюдений. Средние значения и среднеквадратические вариации ОС HF по нашим наземным и спутниковым измерениям ACE-FTS в течение исследуемого периода составляют  $1.77 \times 10^{15}$  и  $1.80 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$  (разница 1.5%) и 21 и 18% соответственно.

**Ключевые слова:** атмосфера, газовый состав, фтористый водород, общее содержание, сезонные вариации, Фурье-спектрометрия.

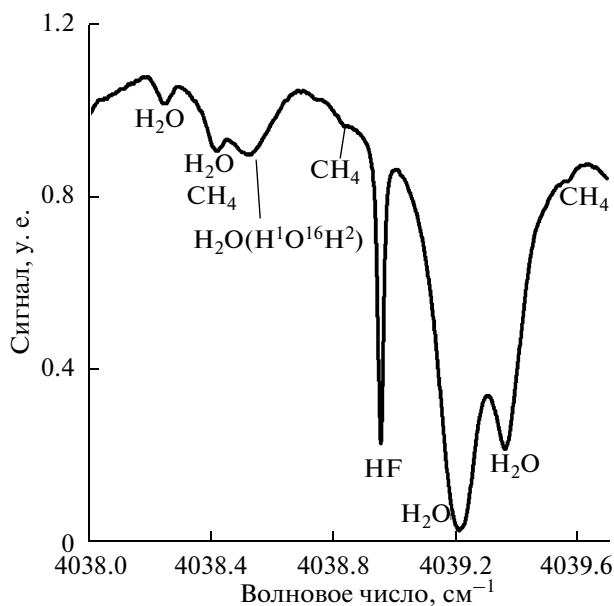
### ВВЕДЕНИЕ

Проблемы современных изменений климата Земли, а также сохранения и восстановления ее озонового слоя стимулировали в последние десятилетия интенсивные исследования содержания различных малых газовых составляющих (МГС) в атмосфере, в том числе хлорных и фтористых соединений [1]. Фтористый водород не участвует интенсивно в фотохимии озона, но является хорошим индикатором динамических процессов в атмосфере. Отношение содержания HCl/HF характеризует также интенсивность гетерогенных процессов на частицах полярных стратосферных облаков [2].

Присутствие в атмосфере HF впервые было зафиксировано в наземных спектроскопических измерениях в 1975 г. [3]. В дальнейшем регулярные измерения общего содержания (ОС) HF проводились различными научными группами, а в последние годы на станциях международной сети наблюдений NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change). Проводились также аэростатные и самолетные измерения вертикальных и широтных распределений содержания HF (см., например, [3, 4]). Спутниковые измерения профилей HF были осуществлены с помощью прибора ATMOS [5], в период с сентября 1991 по ноябрь 2005 г. – прибора HALOE, что позволило

создать глобальную климатологию содержания этого газа в земной стратосфере [7]. В настоящее время спутниковые измерения профилей HF осуществляются с помощью затменного метода аппаратурой ACE-FTS [8].

Они обнаружили рост атмосферного содержания HF, обусловленный ростом содержания хлорфторуглеродов, фотолиз которых в стратосфере и является основным источником HF. Так, в работе [9] приведены результаты измерения ОС HF в период с мая 1977 по июнь 2001 гг. с помощью анализа спектров солнечного излучения на станции Kitt Peak. В работе показано, что в течение анализируемого 24-х летнего периода наблюдался постоянный рост ОС HF. За этот период ОС увеличилось в 4.7 раза от  $2.03 \times 10^{14}$  в мае 1977 г. до  $9.49 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$  в июне 2001 г. Оценки тренда ОС дали величину  $(4.30 \pm 0.15\% \text{ год}^{-1})$ . Это в два раза меньше, чем тренд за период 1977–1990 гг., что свидетельствует о существенном замедлении роста содержания HF [10]. Оценки трендов в более поздние годы показывают, что скорость роста содержания HF в атмосфере и далее существенно уменьшалась. Так, в работе [11] получены практически нулевые тренды HF, что связано с уменьшением содержания  $\text{CCl}_3\text{F}$  и  $\text{CCl}_2\text{F}_2$  в стратосфере.



**Рис. 1.** Типичный измеренный спектр Солнца в области 4038.0–4039.7  $\text{см}^{-1}$  с указанием линий поглощения различных газов.

В работе [12] приведены результаты первых в России наземных измерений ОС HF, полученные при интерпретации спектров прямого солнечного ИК-излучения высокого спектрального разрешения вблизи Санкт-Петербурга. К настоящему времени объем накопленных данных позволил изучить сезонные вариации содержания фтористого водорода в атмосфере, чему и посвящена данная статья.

### НАЗЕМНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ СОЛНЕЧНОГО ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ И МЕТОДИКА ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Измерения ИК спектров прямого солнечного излучения высокого спектрального разрешения были осуществлены с помощью спектрального комплекса, созданного на физическом факультете СПбГУ на базе Фурье-спектрометра (ФС) Bruker IFS125 [13]. Измерения солнечных спектров с высоким разрешением были начаты в январе 2009 г. В настоящей статье рассмотрены спектры за период апрель 2009–апрель 2010 гг., полученные после завершения работ по наладке спектрального комплекса и исследованию его характеристик. Общее число измеренных спектров, охватывающих спектральную область, информативную относительно измерений ОС HF, составляло за этот период 476. Из них мы отобрали 406 спектров высокого качества, исходя из критериев ограничения величины автокорреляционной функции шума измерений на расстояниях более  $0.05 \text{ см}^{-1}$  и отсутствия гармонических искажений спектра, вызванных воз-

никающими иногда нарушениями оптической юстировки установки. В данной статье анализируются результаты определения средневзвешенных значений ОС HF. Различные ограничивающие факторы позволили получить средневзвешенные значения для 78 дней. В течение дня число измерений составляло от 1 до 15 спектров, типичные значения 5–6.

Измеренные спектры имели спектральное разрешение около  $0.005 \text{ см}^{-1}$ , отношение сигнал/шум, определенное по шумовой дорожке “нулевого” сигнала, колебалось в пределах 400–1600, типичное значение около 1200.

Для интерпретации измерений использовалась программа SFIT2, используемая на станциях сети NDACC. Отметим, что результаты, приведенные ранее в работе [12], получены с помощью оригинальной разработанной в СПбГУ методики. Выборочное сравнение результатов работы [12] и SFIT2 показало наличие различий, достигающих 10%. Такие различия вызваны приближенным учетом спектральной аппаратной функции прибора в работе [12] (использовалась гауссовская форма аппаратной функции) и различием в используемом спектральном интервале ( $4038.0\text{--}4039.7 \text{ см}^{-1}$ ) в настоящей работе против интервала шириной менее  $0.2 \text{ см}^{-1}$ , включающего линию поглощения HF  $4038.9625 \text{ см}^{-1}$  в работе [12]).

Целесообразность использования более широкого спектрального интервала связана с тем, что программа SFIT2 в автоматическом режиме уточняет спектральную привязку, калибровку измерений и содержание в атмосфере мешающих газов (в данном случае, в первую очередь, водяного пара), и использование более широкого интервала позволяет получить больший объем информации об этих параметрах.

Мы внесли в использованный нами пакет программного обеспечения (ППО) zephyr2.393.3.21.07 (основанный на SFIT2) небольшие изменения для включения параметров спектральных линий (положения, интенсивности, полуширины и т.д.) из банка данных HITRAN-2008, так как версия HITRAN-2004 [14] не содержит 4-х линий поглощения изотопа  $\text{H}^1\text{O}^{16}\text{H}^2$  (изотоп 4 в номенклатуре HITRAN) водяного пара, вклад которых заметен в использованной нами окрестности линии поглощения HF ( $4038.0\text{--}4039.7$ ).

На рис. 1 приведен типичный вид измеренного солнечного спектра, использованного для расчета ОС HF, с указанием положений различных спектральных линий поглощения. Как видно из рисунка, основную роль поглотителя в области  $4039 \text{ см}^{-1}$  играет водяной пар, и линия HF наблюдается на фоне крыльев группы линий водяного пара.

Отметим, что программа SFIT2 позволяет определять ОС различных газов двумя способами:

– с использованием априорного профиля HF и нахождением к нему поправочного множителя (опция scalar),

– восстановление вертикального профиля содержания HF и получение ОС HF интегрированием по высоте (опция profile).

На рис. 2 (в верхней части) показан участок измеренного 11 июня 2009 г. солнечного спектра, демонстрирующий в крупном масштабе линию поглощения HF. В нижней части того же рис. 2 приведено рассогласование измеренного и расчетного спектров солнечного излучения после решения обратной задачи двумя способами. Эти расхождения составляют в максимуме около 2% для варианта scalar и менее 0.5% в варианте profile и косвенно характеризуют качество решения обратной задачи при двух типах задания априорной информации программы SFIT2. Из приведенного рисунка следует, что минимальные отклонения расчетных и измеренных спектров после решения обратной задачи наблюдаются при использовании алгоритма profile. Отличия между восстановленными двумя способами значениями ОС HF составляют в среднем 5–10%. Этот разброс может характеризовать максимальные систематические погрешности определения ОС HF, обусловленные методикой решения обратной задачи.

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 из данных уровня трех измерений спутника AQUA (приборы AIRS и AMSU-A) [15]. В качестве априорного профиля метана использовался среднеклиматический профиль.

Наши оценки случайной компоненты погрешности определения ОС на основе изменчивости ОС в периоды стабильных состояния атмосферы и функционирования прибора позволяют оценить ее величину в 1–2%. В дальнейшем будут анализироваться данные определения ОС HF полученные по ППО SFIT2 – profile.

Отметим, что исследование различных источников погрешностей определения ОС HF было осуществлено в работе [16]. По оценкам этой работы случайная компонента погрешностей измерений ОС (при близких значениях сигнал/шум) составляет 2.7%, а основной вклад в систематическую погрешность вносит погрешность задания интенсивности линии HF (4.3%). Аналогичные оценки в работе [17] дали общую случайную компоненту погрешности в 6% и систематическую погрешность в ~5% (в основном за счет погрешностей задания интенсивности линии поглощения HF). Отметим, что небольшие вариации оценок погрешностей в различных работах обусловлены

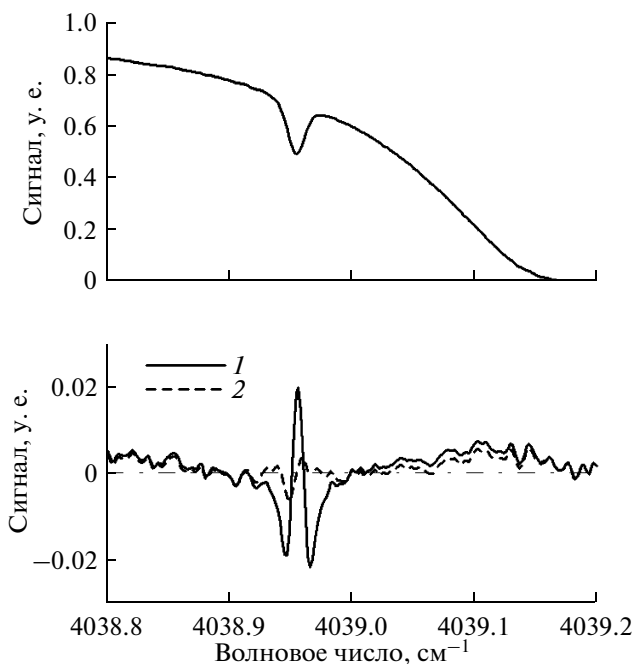


Рис. 2. Пример измеренного спектра солнечного излучения, ослабленного атмосферой (вверху) и спектральных невязок (внизу) для двух опций программы SFIT2: 1 – scalar, 2 – profile.

различными используемыми спектральными интервалами, отличиями в характеристиках аппаратуры, условиях измерений (зенитные углы Солнца и т.д.) и в состоянии атмосферы в моменты измерений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОС HF И ИХ АНАЛИЗ

Фотодиссоциация хлорфторуглеродов (СFC) в тропиках и стратосферный перенос определяют широтное распределение HF, которое в общих чертах характеризуется минимумом в тропической области и максимальными значениями в полярных районах. Так, значения ОС HF составляют в тропиках  $0.3\text{--}0.4 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , увеличиваясь в 2–3 раза до значений  $\sim 1.0 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$  в полярных широтах в летнее время [4, 18]. Сезонные вариации ОС HF сильно отличаются для различных широт. Они очень малы в тропиках –  $0.3\text{--}0.5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$  и значительны в полярных районах. В средних и высоких широтах максимумы ОС наблюдаются зимой–ранней весной, а минимумы – летом. Интенсивность нисходящих движений воздушных масс определяет величины ОС в разные сезоны в полярных районах. Там типичные значения ОС летом составляют  $\sim 1.0 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , а в зимне-весенний период они достигают  $1.5\text{--}2.0 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$  и более, т.е. увеличиваются на 50–100% и более. В средних широтах также наблюдаются значитель-

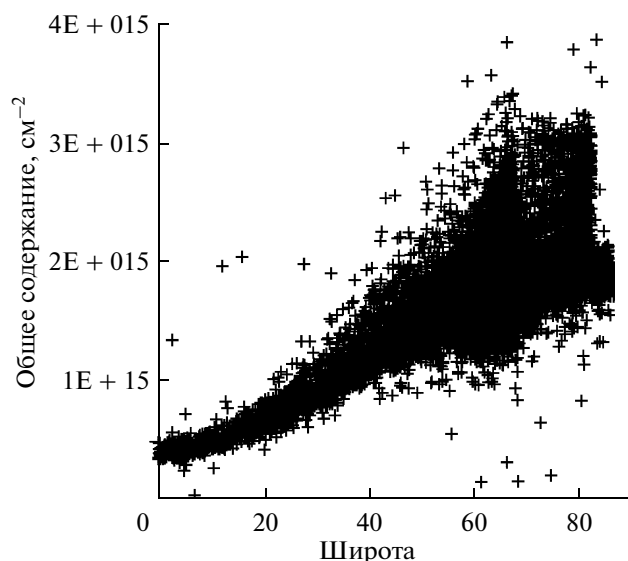


Рис. 3. Значения ОС HF в Северном полушарии, полученные по данным измерений прибора ACE-FTS [19].

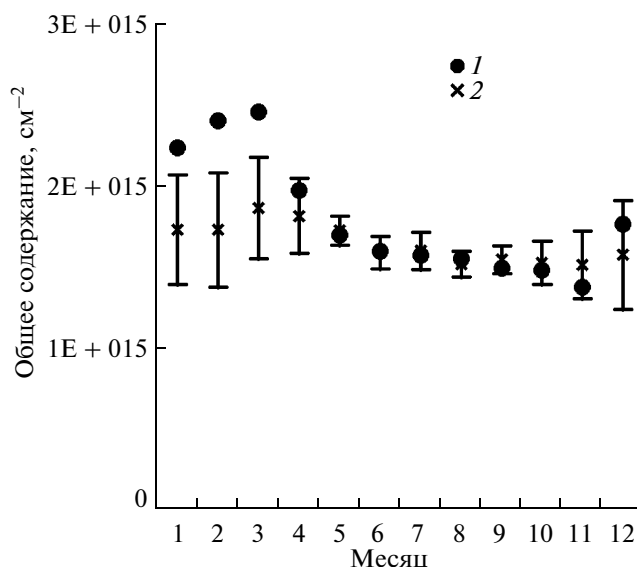


Рис. 4. Среднемесячные ОС HF и их изменчивости и по данным СПбГУ (1) и для станции NDACC Harestua (2). Для Harestua показаны диапазоны межгодовой изменчивости.

ные вариации ОС и, в частности, заметный их рост в зимне-весенний период за счет проникновения полярного воздуха в средние широты при разрушении зимних полярных вихрей. Наглядной иллюстрацией широтных вариаций ОС HF и изменчивости HF является рис. 3, где приведены ОС, полученные при интегрировании профилей HF, измеренных спутниковой аппаратурой ACE-FTS в 2004–2010 гг. над Северным полушарием [19].

Наземные спектроскопические измерения ОС HF в течение 2009–2010 гг. в Петергофе можно охарактеризовать следующими статистическими характеристиками: среднее среднесуточное значение ОС составило  $1.77 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , СКО среднесуточных значений  $3.59 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$  (21%), среднеквадратичная изменчивость в течение суток  $0.82 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , или 4.5%. Диапазон изменчивости среднесуточных значений ОС от 1.2 до  $2.9 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , т.е. близок к 100%.

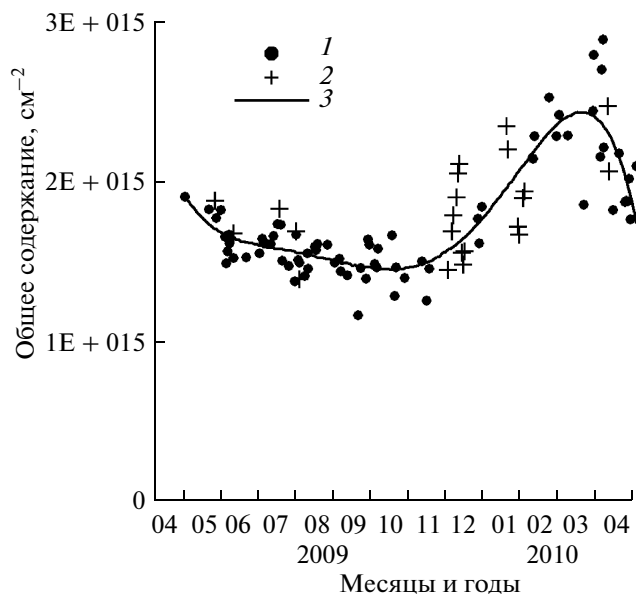
На рис. 4 приведен годовой ход среднемесячных значений ОС HF для СПбГУ, 2009–2010 гг., Петергоф ( $59.9^\circ\text{N}$ ) и для станции Harestua ( $60.2^\circ\text{N}$ ) [21]. Для Harestua показана межгодовая изменчивость за период 2002–2007 гг., для которого доступны данные. Видно, что в этих пунктах наблюдается близкий сезонный ход с минимумом

летом и максимумом зимой – в начале весны (обе станции наблюдений расположены примерно на  $60^\circ\text{N}$ ). В большей части рассматриваемого периода наблюдается согласие сезонного хода в СПбГУ и Harestua в пределах вариаций межгодовой изменчивости измерений ОС для Harestua в различные месяцы. Исключение составляют в зимние месяцы 2010 г. данные СПбГУ, когда ОС заметно превышает значения на станции Harestua, что, вероятно, обусловлено особенностями динамики атмосферы: проникновением воздушных масс полярного вихря в район Петергофа.

Измерения ОС HF в Петергофе были сопоставлены со спутниковыми измерениями прибора ACE-FTS. Особенности затменного метода и характеристик орбиты спутника Atmospheric Chemistry Experiment (ACE) позволили сделать за исследуемый период только два сопоставления, когда спутниковые и наземные измерения совпали в пределах 500 км и были сделаны в один день. В таблице приведены условия проведенных сопоставлений, измеренные значения ОС в СПбГУ и их дневная изменчивость (обусловленная естественными вариациями и погрешностями измерений) и относительные разности результатов двух типов измерений (спутник минус наземные, отнесенные к наземным). Отличия составляют от

Примеры сопоставлений наземных и спутниковых измерений ОС HF

Дата	Расстояние между точками наблюдений, км	ОС HF, $\text{см}^{-2}$ (СПбГУ)	Изменчивость ОС HF, %	Число измерений	Отличие данных ACE, %
2009/07/21	455.4	$1.68 \times 10^{15}$	8	4	1.3
2009/07/24	151.7	$1.51 \times 10^{15}$	2.4	5	-7.0



**Рис. 5.** Сравнение спутниковых и наземных измерений ОС HF в период апрель 2009–апрель 2010 гг.: 1 – по данным СПБГУ, 2 – рассчитанные по профилям отношения смеси HF, измеренным ACE-FTS, 3 – аппроксимация ОС HF СПБГУ полиномом 5-й степени.

1.3 до 7%, что находится в пределах суммарных погрешностей наземных и спутниковых измерений.

Более общее сопоставление дано на рис. 5, где приведены данные наземных и спутниковых измерений в течение всего рассматриваемого периода. Приведенные данные в большинстве случаев не совпадают по дням, но наглядно показывают согласие наземных и спутниковых измерений ОС HF в описании сезонного хода ОС в районе Санкт-Петербурга (Петергоф). Используя аппроксимацию сезонного хода, представленного на рис. 5, с помощью полинома 5-й степени, мы оценили амплитуду сезонного хода в 25%. Значения этой величины, полученные по экспериментальным и модельным оценкам, варьируются от ~10–15% до 30–40% [9, 10, 18, 21] на разных широтах.

Средние значения и среднеквадратические вариации ОС HF по нашим наземным и спутниковым измерениям ACE-FTS в течение исследуемого периода составили  $1.77 \times 10^{15}$  и  $1.80 \times 10^{15}$  см<sup>-2</sup> (разница 1.5%) и 21 и 18% соответственно.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведены первые в России исследования сезонного хода ОС HF на основе наземных измерений спектров солнечного излучения с высоким спектральным разрешением в Петергофе, вблизи Санкт-Петербурга в период с апреля 2009 по апрель 2010 гг. Для интерпретации спектров использовался известный компьютерный код SFIT2, применяемый для аналогичных целей на станциях

NDACC. Вариации при использовании различных опций SFIT-2 (различных априорных ковариационных матриц, априорного профиля HF, границ интервала и т.д.) составляли в среднем 5–10%. Различные оценки погрешностей измерений ОС HF в Петергофе показали, что случайные погрешности составляют 1–5%, а систематическая погрешность 5–6%

2. Сезонный ход ОС HF в Петергофе характеризуется наличием минимума ОС HF летом и максимума зимой–ранней весной. Сопоставление сезонного хода ОС HF в Петергофе и на станции NDACC Harestua [20], расположенных примерно на 60°N, показало близкий сезонный ход, согласующийся с наземными и спутниковыми измерениями других авторов.

3. Проведено сопоставление наземных измерений СПБГУ с данными спутниковых измерений ОС HF (прибор ACE-FTS). Два случая сравнений дают отличия в 1.4 и 7% (расстояние между точками наблюдений меньше 500 км, измерения в один и тот же день). Наблюдается также хорошее количественное согласие в сезонном ходе ОС HF, полученных с помощью двух типов измерений для всего периода сопоставлений. Средние значения и среднеквадратические вариации ОС HF по нашим наземным и спутниковым измерениям ACE-FTS в течение исследуемого периода составили  $1.77 \times 10^{15}$  и  $1.80 \times 10^{15}$  см<sup>-2</sup> (разница 1.5%) и 21 и 18% соответственно.

В этой публикации использованы данные, предоставленные Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC) в свободном доступе (см. <http://www.ndacc.org>). Авторы благодарят Dr. Kaley A. Walker за предоставление возможностей воспользоваться данными измерений спутникового эксперимента The Atmospheric Chemistry Experiment (ACE), поддержанного Космическим агентством Канады и Национальным центром научных и инженерных исследований Канады. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 08-05-00857 и контрактов Минобрнауки № П969 от 27.05.2010 и № 16.740.11.0048 ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006 // WMO. Rep. No. 50. 2007. 572 p.
2. Chipperfield M.P., Burton M., Bell W. et al. On the use of HF as a reference for the comparison of stratospheric observations and models // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. No. D11. P. 12901–12919.
3. Zander R. Recent observations of HF and HCl in upper stratosphere // Geoph. Res. Lett. 1981. V. 8. No. 4. P. 413–416.
4. Mankin V.G., Coffey M.T. Latitudinal Distributions and Temporal Changes of Stratospheric HCl and HF // J. Geophys. Res. 1983. V. 88. No. C15. P. 10776–10784.

5. Zander R., Gunson M.R., Foster J. et al. Stratospheric ClONO<sub>2</sub>, HCl, and HF Concentration Profiles Derived From Atmospheric Trace Molecule Spectroscopy Experiment Spacelab 3 Observations: An Update // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. No. D12. P. 20519–20525.
6. Russell J.M.III, Gordley L.L., Park J.H. et al. The Halogen Occultation Experiment // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. No. D6. P. 10777–10797.
7. Beaver G.M., Russell J.M.III. The climatology of stratospheric HCl and HF observed by HALOE // *Adv. Space Research.* 1998. V. 21. No. 10. P. 1373–1382.
8. Bernath P.F., McElroy C.T., Abrams M.C. et al. Atmospheric Chemistry Experiment (ACE): Mission overview // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 32. No. L15S01, doi:10.1029/2005GL022386.
9. Rinsland C.P., Zander R., Mahieu E. et al. Stratospheric HF column abundances above Kitt Peak (31.9°N latitude): trends from 1977 to 2001 and correlations with stratospheric HCl columns // *J. Quant. Spect. Radiat. Trans.* 2002. V. 74. No. 2. P. 205–216.
10. Rinsland C.P., Levine J.S., Goldman A. et al. Infrared Measurements of HF and HCl Total Column Abundances Above Kitt Peak, 1977–1990 Seasonal Cycles, Long-Term Increases, and Comparisons With Model Calculations // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. No. D8. P. 15523–15540.
11. Rinsland C.P., Boone C., Nassar R. et al. Trends of HF, HCl, CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, CCl<sub>3</sub>F, CHClF<sub>2</sub> (HCFC-22), and SF<sub>6</sub> in the lower stratosphere from Atmospheric Chemistry Experiment (ACE) and Atmospheric Trace Molecule Spectroscopy (ATMOS) measurements near 30°N latitude // *J. Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. No. L16S03, doi:10.1029/2005GL022415.
12. Поберовский А.В., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М. Измерения общего содержания фтористого водорода в атмосфере вблизи Санкт-Петербурга // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2010. Т. 46. № 2. С. 286–288.
13. Поберовский А.В. Наземные измерения ИК-спектров солнечного излучения с высоким спектральным разрешением // *Оптика атмосферы и океана.* 2010. Т. 23. № 1. С. 56–58.
14. Доступ к банку спектроскопических данных HITRAN 2004, 2008 <http://www.cfa.harvard.edu/hitran/>
15. Доступ к данным спутникового зондирования AQUA [http://airs.jpl.nasa.gov/data\\_products/data\\_products\\_toc/](http://airs.jpl.nasa.gov/data_products/data_products_toc/)
16. 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 // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2004. V. 4. P. 5261–5301.
17. Senten C., De Maziere M., Dils B. et al. Technical Note: New ground-based FTIR measurements at Ile de La Reunion: observations, error analysis, and comparisons with independent data // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. V. 8. P. 3483–3508.
18. Luo M., Cicerone R.J., Russell J.M. et al. Observations of stratospheric hydrogen fluoride by halogen occultation experiment (HALOE) // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. No. D8. P. 16691–16705.
19. Сайт ACE FTS [http://www.ace.uwaterloo.ca/instruments\\_acefts.html](http://www.ace.uwaterloo.ca/instruments_acefts.html)
20. Доступ к данным сети NDACC <ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/ndacc/station/>
21. Duchatelet P., Demoulin P., Hase F. et al. Hydrogen fluoride total and partial column time series above the Jungfraujoch from long-term FTIR measurements: Impact of the line-shape model, characterization of the error budget and seasonal cycle, and comparison with satellite and model data // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. No. D22306. doi:10.1029/2010JD014677.

## Seasonal Variations in the Total Content of Hydrogen Fluoride in the Atmosphere

A. V. Polyakov, Yu. M. Timofeev, A. V. Poberovskii, and I. S. Yagovkina

St. Petersburg State University, ul. Ul'yanovskaya 1, Petrodvorets, St. Petersburg, 198504 Russia

e-mail: polyakov@troll.phys.spbu.ru; avpob@troll.phys.spbu.ru

Received September 1, 2010; in final form, March 17, 2011

**Abstract**—The results of ground-based measurements of the total content (TC) of hydrogen fluoride in the atmosphere in Peterhof near St. Petersburg for one year (from April 2009 through April 2010) using a Bruker IFS125 Fourier spectrometer with a high spectral resolution (0.005 cm<sup>-1</sup>) are presented. The well-known computer code SFIT2 (Zephyr-2) was used for the radiation data inversion. Random measurement errors were 1–5% and the systematic error was 5–10%. The seasonal trend of the HF TC in Peterhof is characterized by a minimum in summer and a maximum in winter through early spring and is very close to the seasonal HF TC trend obtained at the Harestua Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC) station located at about the same latitude. A comparison of the St. Petersburg State University (SPbSU) ground-based measurements with the data of satellite HF TC measurements (with an ACE-FTS instrument) showed a good quantitative agreement of the results for the entire period of observations. According to our ground-based measurements and the satellite measurements with the ACE-FTS instrument, the mean values of the HF TC and its rms variations during the period under investigation are  $1.77 \times 10^{15}$  and  $1.80 \times 10^{15}$  cm<sup>2</sup> (difference 1.5%) and 21 and 18%, respectively.

**Keywords:** atmosphere, gas composition, hydrogen fluoride, total content, seasonal variations, Fourier spectrometry.