

УДК 551.510.41

## РОСТ СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОВОДОРОДА В АТМОСФЕРЕ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ ПРЕКРАЩАЕТСЯ

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

Представлено академиком РАН Г.С. Голицыным 20.04.2016 г.  
Поступило 21.04.2016 г.

Анализ данных наземных спектроскопических измерений содержания HCl, осуществленных в Петергофе в период 2009–2016 гг., а также ряда станций международной сети наблюдений NDACC в Северном полушарии показал, что рост содержания HCl, наблюдавшийся с 2007 г. и обусловленный изменениями стратосферной циркуляции, прекратился с 2010–2011 гг. Экспериментальные данные свидетельствуют, что возобновилось падение содержания HCl, которое в Петергофе оценивается в  $4.4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}/\text{год}$ , или  $\sim 1.0\%/год$ .

DOI: 10.7868/S0869565216270219

1. Хлороводород (HCl) в атмосфере Земли наряду с нитратом хлора ( $\text{ClONO}_2$ ) является важнейшим газом-резервуаром активных соединений хлора в стратосфере (Cl и ClO), участвующих в каталитическом процессе разрушения озона [1, 2]. С 50-х годов прошлого столетия наблюдалось увеличение содержания HCl из-за антропогенного влияния. Оно было обусловлено ростом содержания в стратосфере хлорфторуглеродов и их фотодиссоциацией УФ-излучением, приводящей к появлению атомов Cl, и реакцией атомов хлора с метаном [3]. Это увеличение продолжалось до начала 90-х годов прошлого столетия [4]. С середины 90-х годов наблюдалась стабилизация содержания HCl, связанная с мерами, принятыми по ограничению использования хлорфторуглеродов в соответствии с Монреальским протоколом и его дополнениями, а позднее — его падение.

Для проверки эффективности международных мер по восстановлению и стабилизации озонового слоя очень важно контролировать содержание озоноразрушающих газов. В частности, из измерений содержания HCl и  $\text{ClONO}_2$  можно определить количество активных хлоринов, которые способны разрушать озон. Измерения на 17 наземных станциях сети NDACC (the Network for the Detection of Atmospheric Composition Change) и моделирование показали, что с конца столетия и в начале XXI в. наблюдалось уменьшение содержания HCl в стратосфере примерно со скоростью  $1\%/год$  [5].

В работе [6] приведены данные измерений HCl на ряде наземных станций международной сети NDACC, показывающие рост содержания HCl в стратосфере в Северном полушарии, начиная примерно с 2007 г. Этот рост объяснялся не появлением новых источников хлора, а изменением стратосферной циркуляции. В данной работе анализируются измерения содержания HCl в Петергофе (2009–2016 гг.), а также на ряде станций NDACC в Северном полушарии и показано, что этот рост прекратился.

2. С января 2009 г. в СПбГУ на кафедре физики атмосферы физического факультета в Петергофе в 28 км к западу от центра Санкт-Петербурга ( $59^\circ 53' \text{ с.ш.}$ ,  $29^\circ 49' \text{ в.д.}$ ) проводятся наземные измерения спектров прямого солнечного излучения в ИК-области спектра измерительным спектральным комплексом на основе фурье-спектрометра высокого спектрального разрешения IFS-125HR [7]. Эти измерения, как и на станциях сети NDACC, позволяют определять общее содержание HCl [8], а также его содержание в стратосфере [9, 10]. В наших исследованиях использовались спектральные интервалы  $2727.73\text{--}2727.83$ ,  $2775.70\text{--}2775.80$ ,  $2925.80\text{--}2926.0 \text{ см}^{-1}$ , рекомендованные в сети NDACC для измерения содержания HCl. Для интерпретации измерений использовалась программа SFIT2, также применяемая на станциях сети NDACC [8, 11]. Оценки случайных и систематических погрешностей показали, что полная погрешность общего и стратосферного содержания HCl составляет 4–5% для единичного измерения [8, 9].

Для анализа временных вариаций содержания HCl использовались данные измерений в Петергофе в период 2009–2016 гг., а также на станциях

Санкт-Петербургский государственный университет  
\*E-mail: a.v.polyakov@spbu.ru

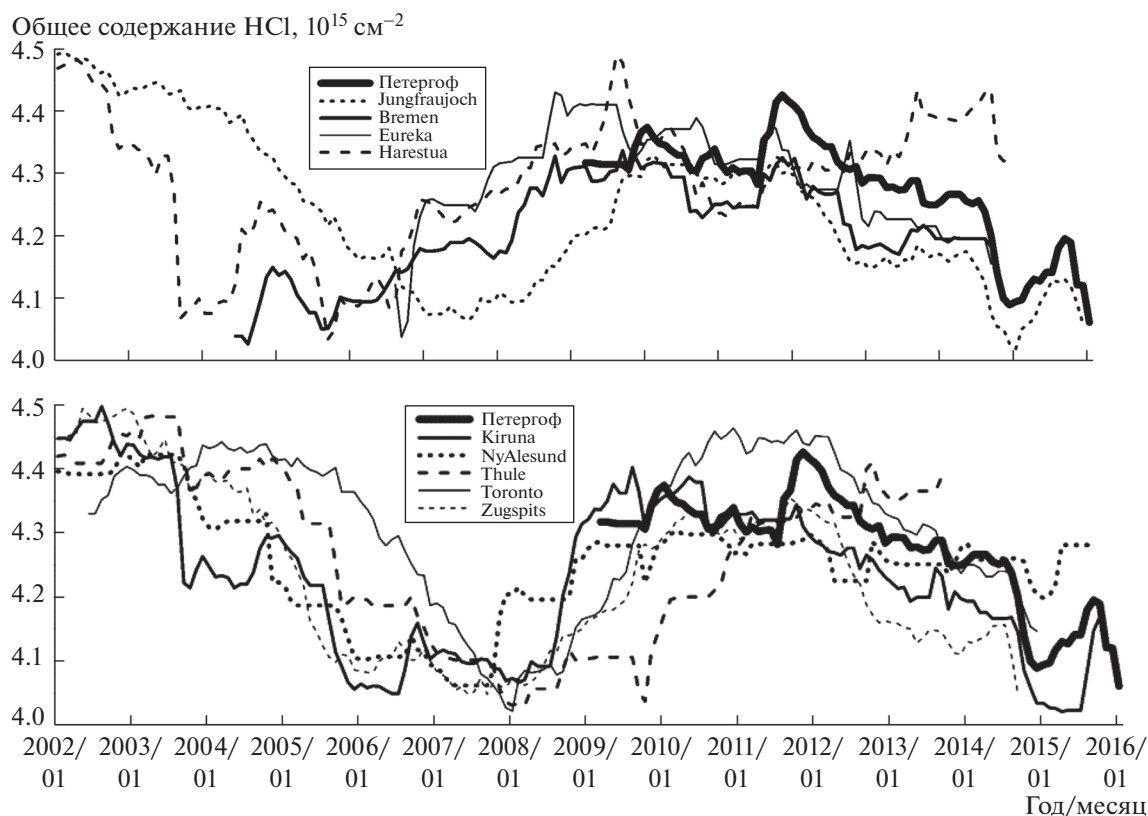


Рис. 1. Временной ход общего содержания HCl по данным различных станций сети NDACC и измерений СПбГУ. Скользящее среднее за 3 года.

NDACC в Северном полушарии (станции Bremen, Eureka, Harestua, Kiruna, NyAlesund, Thule, Toronto, Zugspitz) за различные периоды наблюдений, данные которых доступны на сайте NDACC.

3. На рис. 1 представлены для Петергофа и станций NDACC среднесуточные измерения, сглаженные скользящим средним по 3 года с шагом 1 месяц (как и на рис. 1 работы [6], посвященной обнаружению роста содержания HCl).

Из рис. 1 видно, что примерно до 2007 г. на всех станциях наблюдалось уменьшение содержания HCl, а с 2007–2008 гг. – рост его содержания. Начиная с 2010–2011 гг. все станции NDACC, за исключением Thule (Гренландия) и Harestua (Норвегия), четко показывают прекращение роста HCl и продолжение падения содержания HCl в последующие годы. Данные измерений в Петергофе 2009–2016 гг. также подтверждают эту тенденцию. На двух указанных выше станциях немонотонный рост еще продолжается.

Оценка на основе линейной аппроксимации содержания HCl по единичным измерениям в Петергофе за 2009–2016 гг. показала, что падение составляет  $(4.4 \pm 1.4) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}/\text{год}$ , или  $1.0 \pm 0.33\%/\text{год}$  для уровня значимости 0.05, что

практически совпадает с отрицательными трендами, зарегистрированными до 2007 г. [5].

Экспериментальные исследования проведены на аппаратуре РЦ “Геомодель” СПбГУ. Используемые в работе данные были получены как часть результатов сети по наблюдению за изменениями состава атмосферы (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change, NDACC) и представлены NDACC в открытом доступе (см. <http://www.ndacc.org>).

Исследования выполнены за счет финансирования по гранту Российского научного фонда № 14–17–00096.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Molina M.J., Rowland F.S. Stratospheric Sink for Chlorofluoromethanes: Chlorine Atomcatalysed Destruction of Ozone // *Nature*. 1974. V. 249. № 5460. P. 810–812.
2. Crutzen P.J., Isaksen I.S.A., McAfee J.R. The Impact of the Chlorocarbon Industry on the Ozone Layer // *J. Geophys. Res.* 1978. V. 83. Iss. C1. P. 345–363.
3. Solomon S. Antarctic Ozone: Progress Towards a Quantitative Understanding of Ozone Depletion // *Nature*. 1990. V. 347. P. 347–354.

4. *Rinsland C.P., Mahieu E., Zander R., Jones N.B., Chipperfield M.P., Goldman A., Anderson J., Russell III J.M., Demoulin P., Notholt J., Toon G.C., Blavier J.-F., Sen B., Sussmann R., Wood S.W., Meier A., Griffith D.W.T., Chiou L.S., Murcray F.J., Stephen T.M., Hase F., Mikuweit S., Schulz A., Blumenstock T.* Long-Term Trends of Inorganic Chlorine from Ground-Based Infrared Solar Spectra: Past Increases and Evidence for Stabilization // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № D8. P. 4252–4272.
5. *Kohlhepp R., Ruhnke R., Chipperfield M.P., De Maziere M., Notholt J., Barthlott S., Batchelor R.L., Blatherwick R.D., Blumenstock Th., Coffey M.T., Demoulin P., Fast H., Feng W., Goldman A., Griffith D.W.T., Hamann K., Hannigan J.W., Hase F., Jones N.B., Kagawa A., Kaiser I., Kasai Y., Kirner O., Kouker W., Lindenmaier R., Mahieu E., Mittermeier R.L., Monge-Sanz B., Morino I., Murata I., Nakajima H., Palm M., Paton-Walsh C., Rafalski U., Reddmann Th., Rettinger M., Rinsland C.P., Rozanov E., Schneider M., Senten C., Servais C., Sinnhuber B.-M., Smale D., Strong K., Sussmann R., Taylor J.R., Vanhaelewyn G., Warneke T., Whaley C., Wiehle M., Wood S.W.* Observed and Simulated Time Evolution of HCl, ClONO<sub>2</sub>, and HF Total Column Abundances // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12. P. 3527–3556.
6. *Mahieu E., Chipperfield M.P., Notholt J., Reddmann T., Anderson J., Bernath P.F., Blumenstock T., Coffey M.T., Dhomse S.S., Feng W., Franco B., Froidevaux L., Griffith D.W.T., Hannigan J.W., Hase F., Hossaini R., Jones N.B., Morino I., Murata I., Nakajima H., Palm M., Paton-Walsh C., Russell III J.M., Schneide R.M., Servais C., Smale D., Walker K.A.* Recent Northern Hemisphere Stratospheric HCl Increase due to Atmospheric Circulation Changes // *Nature*. 2014. V. 515. P. 104–107.
7. *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 // *ДАН*. 2010. Т. 432. № 2. С. 257–259.
8. *Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В.* Наземные измерения общего содержания хлористого водорода в атмосфере вблизи Санкт-Петербурга // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т. 49. № 4. С. 447–455.
9. *Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Виrolайнен Я.А.* Учет высоких приземных концентраций атмосферных паров соляной кислоты при наземных спектроскопических измерениях // *Оптика атмосферы и океана*. 2015. Т. 28. № 2. С. 153–158.
10. *Viirolainen Y., Timofeyev Yu., Polyakov A., Ionov D., Pobеровsky A.* Intercomparison of Satellite and Ground-Based Measurements of Ozone, NO<sub>2</sub>, HF, and HCl near Saint Petersburg, Russia // *Intern. J. Remote Sensing*. 2014. V. 35. № 15. P. 5677–5697.
11. *Виrolайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В.* Сравнение спутниковых и наземных измерений общего содержания озона // *Исслед. Земли из космоса*. 2013. № 4. С. 83–91.