

# 15 ЛЕТ ИЗМЕРЕНИЙ СТРАТОСФЕРНЫХ ГАЗОВ НА СТАНЦИИ NDACC ST.PETERSBURG

Виролайнен Я.А.<sup>1</sup>, Поляков А.В.<sup>1</sup>, Акишина С.В.<sup>1</sup>, Макарова М.В.<sup>1</sup>, Тимофеев Ю.М.<sup>1</sup>,  
Поберовский А.В.<sup>1</sup>, Неробелов Г.М.<sup>1,2,3</sup>, Имхасин Х.Х.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>СПб ФИЦ РАН – Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, г.  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет,  
г. Санкт-Петербург, Россия

e-mail: [yana.virolainen@spbu.ru](mailto:yana.virolainen@spbu.ru), [a.v.polyakov@spbu.ru](mailto:a.v.polyakov@spbu.ru), [s.akishina@spbu.ru](mailto:s.akishina@spbu.ru), [m.makarova@spbu.ru](mailto:m.makarova@spbu.ru),  
[y.timofeev@spbu.ru](mailto:y.timofeev@spbu.ru), [a.poberovsky@spbu.ru](mailto:a.poberovsky@spbu.ru), [akulishe95@mail.ru](mailto:akulishe95@mail.ru), [kh.imkhasin@spbu.ru](mailto:kh.imkhasin@spbu.ru)

Получены и проанализированы данные наземных спектрометрических ИК-измерений содержания малых газовых составляющих (МГС) атмосферы на станции NDACC St. Petersburg в 2009–2023 гг. Исследована временная изменчивость различного масштаба содержания озона, HF, HCl, HNO<sub>3</sub> и ClONO<sub>2</sub>, включая оценки трендов, сезонный цикл, а также кратковременные вариации. За рассмотренный период наблюдается уменьшение хлорсодержащих газов в атмосфере в окрестностях Санкт-Петербурга, обусловленное выполнением Монреальского протокола. Показана эффективность использования измерений содержания HF в качестве динамического фактора, позволяющего разделить периоды возникновения озоновых аномалий вследствие динамических и химических механизмов. Продемонстрированы возможности метода для изучения и объяснения короткопериодной временной изменчивости МГС стратосферы, вовлеченных в циклы разрушения и формирования озонового слоя.

**Введение.** В последние десятилетия в Северном полушарии наблюдается периодическое уменьшение общего содержания (ОС) озона в зимне-весенний период [1], приводящее к негативным последствиям для людей, поскольку это уменьшение часто наблюдается вблизи густонаселенных районов. Аномалии в содержании стратосферного озона, так называемые озоновые мини-дыры, существенно влияют на УФ освещенность поверхности и радиационный режим стратосферы.

Степень разрушения полярного озона находится в тесной связи с температурой стратосферы, определяющей формирование в изолированной внутри полярного стратосферного вихря (ПСВ) воздушной массе полярных стратосферных облаков, на поверхности частиц которых проходят гетерогенные химические реакции, накапливающие вещества, ведущие к последующему фотохимическому разрушению озона ранней весной. При появлении весной солнечного света из-за низкой температуры нижней стратосферы в атмосфере возникают восходящие движения воздушных масс, выносящие в стратосферу бедный озоном воздух из

нижних слоев и способствующие быстрому разрушению озона на больших высотах. При разрушении ПСВ полярный воздух может смешиваться со среднеширотным, что может приводить также к уменьшению содержания стратосферного озона и в средних широтах.

Один из механизмов влияния динамических процессов на уменьшение ОС озона заключается в ослаблении в зимнее время активности планетарных волн, из-за чего в зимне-весенний период уменьшается нисходящее поступление богатого озоном воздуха средних широт в полярные области, где и так внутри ПСВ во время полярной ночи происходит разрушение озона. Если же ПСВ не разрушается в зимнее время внезапным стратосферным потеплением, то пик химического разрушения озона обычно приходится на март в полярных и субполярных областях северного полушария [2].

Для понимания механизмов разрушения озона и прогнозирования его изменений необходим мониторинг и анализ не только ОС озона, но и других малых газовых составляющих (МГС) атмосферы, влияющих на изменчивость стратосферного содержания озона.

**Наблюдения и анализ.** На станции международной наблюдательной сети NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change) St. Petersburg, расположенной в кампусе СПбГУ в Петергофе, с 2009 г. измеряются спектры нисходящего солнечного ИК-излучения высокого спектрального разрешения с помощью ФС Bruker IFS 125HR [3]. Анализ спектров выполняется с помощью программных комплексов SFIT4 и PROFFIT96, используемых на наблюдательной сети NDACC [4].

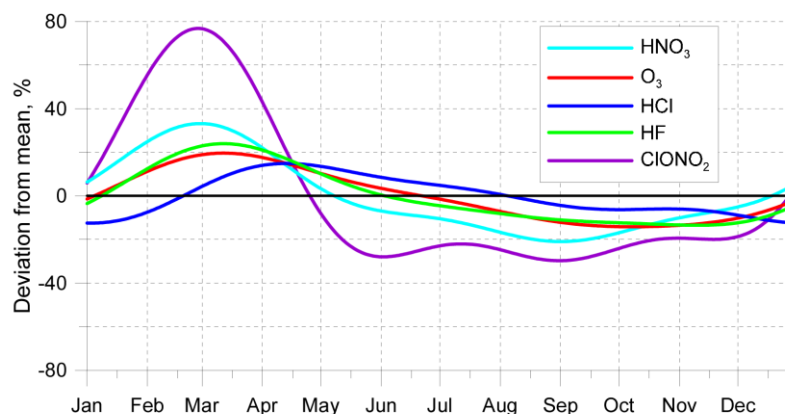


Рисунок 1 – Сезонный ход содержания ОС МГС в окрестностях станции St. Petersburg, полученный по наземным ИК-измерениям

Для изучения изменчивости стратосферных МГС мы исследовали временные ряды ОС озона, HCl, ClONO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub> и HF, полученные на станции NDACC St. Petersburg в Петергофе [5, 6], а также проанализировали возможные причины наблюдаемых озоновых вариаций. На рис. 1 приведена сезонная изменчивость рассмотренных величин ОС МГС вблизи Санкт-Петербурга.

Для всех стратосферных МГС характерен максимум в весенний период, обусловленный как протеканием химических реакций весной, так и динамикой стратосферы, в частности, перемещением высоты тропопаузы. В табл. 1 приведены оценки тренда ОС МГС в окрестностях Санкт-Петербурга [7], для хлорсодержащих газов наблюдается статистически значимый отрицательный тренд, обусловленный принятием и выполнением Монреальского протокола. Для HF наблюдается статистически значимый рост ОС, возможно связанный с химической неактивностью соединения и долгим временем жизни в стратосфере. К тому же он содержится в соединениях менее опасных для озонового слоя, эмиссии которых в атмосферу продолжают.

Таблица 1. Оценки тренда ОС МГС на станции NDACC St.Petersburg в 2009–2022 гг.

МГС	Оценка тренда, % в год
<b>O<sub>3</sub></b>	+0.02±0.20
<b>HNO<sub>3</sub></b>	+0.23±0.34
<b>ClONO<sub>2</sub></b>	<b>-1.64±0.85</b>
<b>HCl</b>	<b>-0.22±0.21</b>
<b>HF</b>	<b>+0.47±0.25</b>

На рис. 2 приведено отношение ОС озона к ОС HF, исключая влияние на уменьшение озона динамических факторов. При значениях этого отношения меньше 4000, возможно, имело место вторжение в атмосферу над Санкт-Петербургом полярных воздушных масс, в которых происходило химическое разрушение озона, наблюдаемое по результатам ИК-измерений.

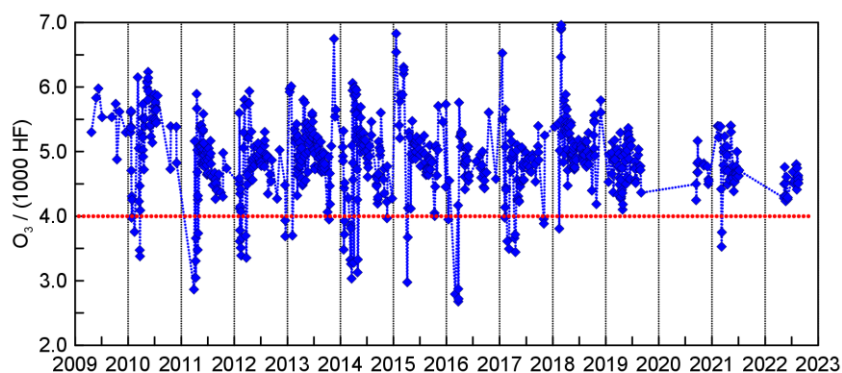


Рисунок 2 – Отношение ОС O<sub>3</sub> к ОС HF на станции St. Petersburg

Подобное явление наиболее ярко происходило в марте 2016 г., отдельные эпизоды возможного химического разрушения озона в воздушных массах над Санкт-Петербургом также было зафиксировано в 2011, 2014 и 2023 гг. [5, 6, 8].

**Заключение.** На основе полученных и проанализированных данных наземных спектрометрических ИК-измерений на станции NDACC St. Petersburg за период измерений 2009-2023 гг. была исследована временная изменчивость различного масштаба ОС ряда стратосферных МГС, включая оценки трендов, сезонный цикл и кратковременные вариации,

связанные с процессами разрушения и образования стратосферного озона. Показано уменьшение хлорсодержащих газов в атмосфере в окрестностях Санкт-Петербурге, обусловленное выполнением Монреальского протокола. Продемонстрированы возможности наземного спектроскопического ИК-метода для изучения и объяснения короткопериодной временной изменчивости МГС стратосферы, вовлеченных в циклы разрушения и формирования озонового слоя.

Спектроскопические измерения выполнены на оборудовании ресурсного центра СПбГУ «Геомодель». Исследование выполнено при поддержке СПбГУ (номер Проекта 116234986).

#### Литература:

1. *Bernhard G.H., V.E. Fioletov, J.U. Groos, I. Ialongo, B. Johnsen, K. Lakkala, T. Svenby, R. Muller, T. Svendby* Record-Breaking Increases in Arctic Solar Ultraviolet Radiation Caused by Exceptionally Large Ozone Depletion in 2020 // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. N 24. P. e2020GL090844.
2. WMO, 2023: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022. GAW Report No. 278 / WMO, UNEP, Geneva, Switzerland. 520 p.
3. *Timofeyev Yu., Virolainen Ya., Makarova M., et al.* Ground-based spectroscopic measurements of atmospheric gas composition near Saint Petersburg (Russia) // *J. Mol.Spectr.* 2016. V. 323. P. 2–14.
4. *Hase F., Hannigan J. W., Coffey M. T., et al.* Intercomparison of retrieval codes used for the analysis of high-resolution ground-based FTIR measurements // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2004. V. 87. P. 25–52.
5. *Виролайнен Я. А., Поляков А. В., Тимофеев Ю. М.* Анализ изменчивости стратосферных газов по данным наземных спектрометрических наблюдений в районе Санкт-Петербурга // *Изв. РАН ФАО.* 2021. Т. 57. № 2. С. 163–174.
6. *Virolainen Y., Polyakov A., Timofeyev Y., Poberovsky A.* FTIR Measurements of Stratospheric Gases at the St. Petersburg Site // In: *Kosterov, A., Lyskova, E., Mironova, I., Apatenkov, S., Baranov, S. (eds) Problems of Geocosmos—2022. ICS 2022. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences.* 2023. Springer, Cham.
7. *Polyakov A., Poberovsky A., Makarova M., Virolainen Y., Timofeyev Y., Nikulina A.* Measurements of CFC-11, CFC-12, and HCFC-22 total columns in the atmosphere at the St. Petersburg site in 2009-2019 // *Atmos. Meas. Tech.* 2021. V. 14, N 8. P. 5349–5368.
8. *Akishina S., Polyakov A., Virolainen Y.* Ground-based measurements of HF and HCl total columns in atmosphere near Saint Petersburg (2009–2023) // *International Journal of Remote Sensing.* 2024. V. 45. N 7. P. 2315-2336.