

ИЗМЕРЕНИЯ ТРОПОСФЕРНОГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА СПУТНИКОВЫМ ПРИБОРОМ ИКФС-2

Виролайнен Я.А.¹, Поляков А.В.¹, Неробелов Г.М.^{1,2,3}, Акишина С.В.¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

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

³Российский 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), [akulishe95@mail.ru](mailto: akulishe95@mail.ru), [s.akishina@spbu.ru](mailto: s.akishina@spbu.ru)

Проведен анализ данных спутниковых измерений тропосферного содержания озона (ТрСО), полученных из спектров уходящего теплового излучения, измеренных российским прибором ИКФС-2 на метеорологическом спутнике «Метеор-М» №2. Проведено сопоставление спутниковых измерений ТрСО в слое от поверхности до уровней с давлением 300 мбар и 400 мбар с данными наземных измерений на станциях наблюдательной сети IRWG-NDACC. Средние стандартные отклонения разностей для обоих слоев составили около 3 е.Д. Средние разности зависят от высоты и географического расположения наземной станции, варьируя от +3 до -12 е.Д. Приведены примеры распределения среднемесячных величин ТрСО по данным ИКФС-2 над территорией России. Показано, что ИКФС-2 может отслеживать временную и пространственную изменчивость ТрСО.

Введение. В последнее время в мире значительно возрос интерес к изучению пространственно-временного распределения тропосферного содержания озона (ТрСО), поскольку озон в тропосфере является токсичным и парниковым газом, участвует в различных химических и фотохимических реакциях и т. д. [1]. В настоящее время информацию о глобальном распределении ТрСО получают с помощью различных спутниковых приборов (IASI, IASI+GOME2, TROPOMI, OMI+MLS и т. д.).

В работе представлены результаты измерений ТрСО в слоях атмосферы от поверхности Земли до уровней с давлением в 400 и 300 гПа (что примерно соответствует 7 и 9 км), полученные с помощью российского прибора ИКФС-2, измерявшего собственное излучение планеты на борту спутника «Метеор-М» №2 в период с 2015 по 2022 гг. Для получения данных о ТрСО использовался оригинальный алгоритм, основанный на методе искусственных нейронных сетей и методе главных компонент, разработанный в СПбГУ [2]. Погрешность измерений ТрСО оценивается как 2.7 и 3.6 е.Д. (12–15%) для слоев ниже 400 и 300 мбар, соответственно.

Обсуждение. Предварительно мы сопоставили данные спутниковых и наземных измерений ТрСО, которые в безоблачные дни измеряются на станциях международной измерительной сети

NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change), оснащенных Фурье-спектрометрами Bruker IFS 125/120HR высокого спектрального разрешения [3] (FTIR-измерения). Погрешность FTIR-измерений TrCO оценивается в 7–10% [4, 5]. На станции NDACC St. Petersburg, расположенной в кампусе СПбГУ в Петергофе (59.88° N , 29.82° E , 20 м над уровнем моря) TrCO определяется с 2009 г. [5, 6].

Таблица 1. Сопоставление TrCO в слое ниже 400 гПа по данным FTIR-измерений и ИКФС-2 (N – число сопоставлений, Δ – средняя разность в е.Д. (FTIR минус ИКФС-2), σ – стандартное отклонение разностей в е.Д. Радиус осреднения - 200 км от наземной станции.

Станция	Расположение			N	Разность	
					Δ	σ
Eureka, Канада	80.05° N	86.42° W	610 м	282	+3.6	4.2
Ny Ålesund, Норвегия	78.92° N	11.93° E	15 м	120	-0.13	4.4
Thule (Гренландия), Дания	76.53° N	68.74° W	220 м	553	+2.0	3.4
Kiruna, Швеция	67.84° N	20.41° E	419 м	491	+1.3	3.8
Harestua, Норвегия	60.2° N	10.8° E	596 м	153	-0.41	2.5
St. Petersburg, Россия	59.9° N	29.8° E	20 м	247	+0.84	3.6
Bremen, Германия	53.1° N	8.8° E	27 м	129	+0.64	2.7
Zugspitze, Германия	47.42° N	10.98° E	2964 м	559	-10.4	3.1
Jungfrau joch, Швейцария	46.55° N	7.98° E	3580 м	441	-12.5	2.0
Toronto - ТАО, Канада	43.66° N	79.40° W	174 м	679	+1.9	4.1
Rikubetsu, Япония	43.46° N	143.77° E	380 м	100	-1.2	3.5
Boulder (Колорадо), США	39.99° N	105.26° W	1634 м	367	-1.9	2.2
Tsukuba, Япония	36.05° N	140.13° E	31 м	184	+2.6	4.1
Izaña (Тенерифе), Испания	28.30° N	16.48° W	2367 м	395	-8.2	2.0
Mauna Loa (Гавайи), США	19.54° N	155.58° W	3397 м	659	-8.5	2.1
Altzomoni, Мексика	19.12° N	98.66° W	3985 м	216	-11.1	2.2
Maido Остров Ре-Юнион, Франция	21.1° S	55.4° E	2155 м	342	-5.8	2.1
Wollongong, Австралия	34.41° S	150.88° E	30 м	212	+2.7	2.8
Lauder, Новая Зеландия	45.04° S	169.68° E	370 м	940	+1.2	2.1
Все				7069		2.99

Географические координаты, а также высота станций над уровнем моря (см. табл. 1) могут влиять на результаты сопоставления спутниковых и наземных измерений. Поскольку спутниковые измерения осреднялись в радиусе 100 или 200 км от наземных станций, то, например, при расположении станции в горной местности, часть спутниковых данных может захватывать как горы, так и низменности, а в случае расположения станции на островах - большая часть осредняемых спутниковых измерений относится к водной поверхности.

В среднем для обоих слоев тропосферы и для обоих вариантов осреднения спутниковых измерений вокруг станций стандартные отклонения разностей (COP) составили около 3 е.Д., что

составляет ~15% от ТрСО по данным FTIR-измерений. При этом для разных станций и средние разности (СР), и СОР значительно различаются, как и их изменение при разных вариантах сопоставлений. В табл. 1 показаны СР и СОР для ТрСО в слое ниже 400 гПа для каждой станции по отдельности (осреднение спутниковых измерений с центрами пикселей, попадающими в радиус 200 км от наземной станции). Наземные данные осреднялись в течение каждого дня измерений. СР зависят от высоты и географического расположения наземной станции, варьируя от +3 до -12 е.Д.; СОР составляют 2–4 е.Д. Расхождения наземных и спутниковых данных соответствуют результатам, полученным для близкого по характеристикам прибора IASI [7].

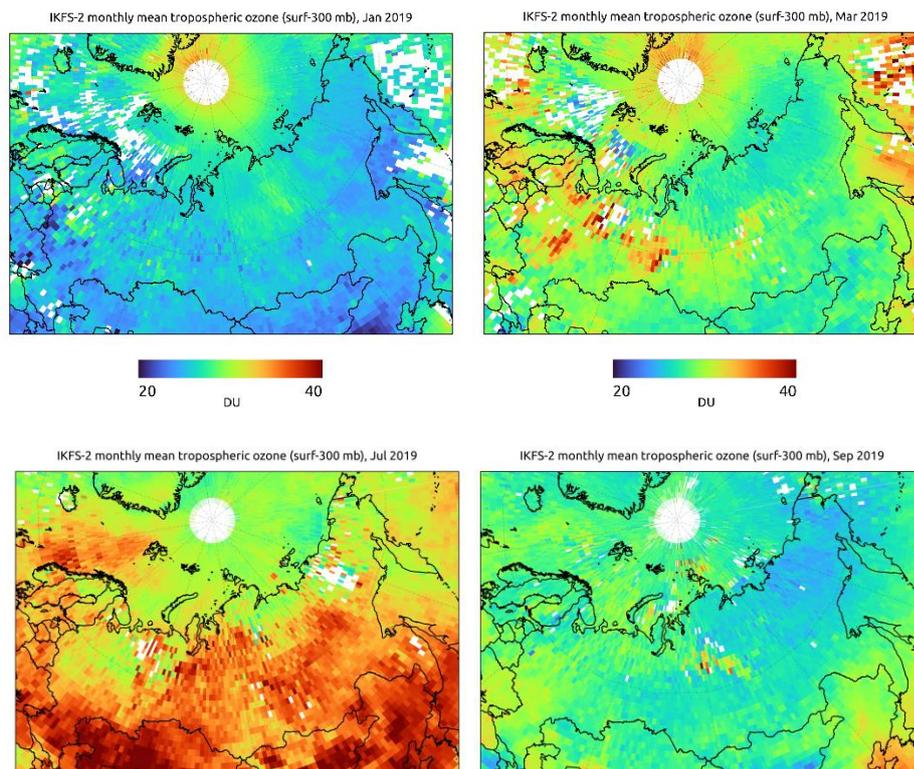


Рисунок 1 – Примеры распределения среднемесячных величин ТрСО по данным ИКФС-2 январь, март, июль и сентябрь 2019 года (слева направо, сверху вниз).

На рис. 1 представлено распределение спутниковых измерений ИКФС-2 ТрСО в слое тропосферы до 300 мбар над территорией России для разных месяцев 2019 г. ИКФС-2 хорошо отслеживает пространственную и временную изменчивость ТрСО. В слой до 300 мбар может попадать информация из стратосферы, что видно для марта в центральный и западных (северо-западных) регионах России (максимум общего содержания озона приходится на эти регионы). В летний период рост ТрСО характерен для более южных регионов, центральной части России и Сибири, обусловленный образованием озона в нижних слоях тропосферы. Минимум ТрСО над всей территорией России наблюдается зимой.

Результаты. Проведен первичный анализ данных спутниковых измерений ТрСО в слоях атмосферы от поверхности до уровней с давлением 300 мбар и 400 мбар, полученных из спектров уходящего теплового излучения, измеренных российским прибором ИКФС-2 с борта метеорологического спутника «Метеор-М» №2. Сопоставление спутниковых и наземных измерений FTIR-методом на станциях наблюдательной сети NDACC продемонстрировало их хорошее согласие: средние СОР составили около 3 е.Д., СР зависят от высоты и географического расположения наземной станции, варьируя от +3 до -12 е.Д. Приведены примеры распределения среднемесячных величин ТрСО по данным ИКФС-2 над территорией России. Показано, что ИКФС-2 может отслеживать изменчивость ТрСО.

Наземные спектроскопические измерения были выполнены на научном оборудовании ресурсного центра СПбГУ «Геомодель». Исследование профинансировано грантом Российского научного фонда № 23-27-00166, <https://rscf.ru/project/23-27-00166/>.

Литература:

1. Gaudel A., Cooper O.R, Ancellet G., et al. Tropospheric Ozone Assessment Report: Present-day distribution and trends of tropospheric ozone relevant to climate and global atmospheric chemistry model evaluation // *Elementa: Science of the Anthropocene*. 2018. V. 39. № 6.

2. Поляков А.В., Виролайнен Я.А., Неробелов Г.М., Акишина С.В. Методика определения тропосферного содержания озона из спектральных измерений уходящего теплового излучения спутниковым прибором ИКФС-2 // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2024 (на рецензии).

3. Vigouroux C., De Mazière M., Demoulin P., Servais C., Hase F., Blumenstock T., Kramer I., Schneider M., Mellqvist J., Strandberg A., Velasco V., Notholt J., Sussmann R., Stremme W., Rockmann A., Gardiner T., Coleman M., Woods P. Evaluation of tropospheric and stratospheric ozone trends over Western Europe from ground-based FTIR network observations // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. V. 8, N 23. P. 6865–6886.

4. García O.E., Schneider M., Redondas A., González Y., Hase F., Blumenstock T., Sepúlveda E. Investigating the long-term evolution of subtropical ozone profiles applying ground-based FTIR spectrometry // *Atmos. Meas. Tech.* 2012. V. 5. № 11. P. 2917–2931.

5. Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Еременко М., Дюфор Г. Определение содержания озона в различных слоях атмосферы с помощью наземной Фурье-спектрометрии // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51. № 2. С. 191–200.

6. Виролайнен Я.А., Ионов Д.В., Поляков А.В. Анализ результатов многолетних измерений содержания озона в тропосфере на станции СПбГУ в Петергофе // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2023. Т. 59. №4. С. 474–484.

7. Boynard A., Hurtmans D., Garane K., Goutai, F., Hadji-Lazaro J., Koukouli M.E., Wespes C., Vigouroux C., Keppens A., Pommereau J.-P., Pazmino A., Balis D., Loyola D., Valks P., Sussmann R., Smale D., Coheur P.-F., Clerbaux C. Validation of the IASI FORLI/EUMETSAT ozone products using satellite (GOME-2), ground-based (Brewer–Dobson, SAOZ, FTIR) and ozonesonde measurements // *Atmos. Meas. Tech.* 2018. V. 11, N 9. P. 5125–5152.