

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА ПО ДАННЫМ  
ИЗМЕРЕНИЙ СПУТНИКОВОГО ИК ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРА  
ИКФС-2 В ОБЛАЧНОЙ АТМОСФЕРЕ  
(МИСЗ «МЕТЕОР-М» № 2)

© 2018 А. С. Гаркуша<sup>1</sup>, А. В. Поляков<sup>1\*</sup>, Ю. М. Тимофеев<sup>1</sup>,  
Я. А. Виролайнен<sup>1</sup>, А. В. Кухарский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет

<sup>2</sup> Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”, Москва

\*E-mail: a.v.polyakov@spbu.ru

Поступила в редакцию 25.05.2017 г.

Разработана новая методика определения общего содержания озона (ОСО) по измерениям спектров уходящего теплового ИК-излучения спутниковым прибором ИКФС-2 при наличии облачности. Анализ погрешностей разработанной методики показал, что отличия измеренных ОСО прибором ИКФС-2 от спутниковых (прибор ОМІ) и наземных (приборы Добсон, Брюер, М-124) измерений, как правило, составляют 3–5%. Наибольшие отличия (до 10%) наблюдаются в южных полярных широтах при наблюдениях озоновой дыры над Антарктидой. Прибор ИКФС-2 позволил изучить озоновые мини-дыры над Россией в первом квартале 2016 г. Данные измерений показывают почти двукратное уменьшение ОСО в отдельные дни.

**Ключевые слова:** озоносфера, дистанционное зондирование в облачной атмосфере, общее содержание озона, “Метеор-М” № 2, прибор ИКФС-2, валидация

DOI: 10.7868/S0205961418020069

## ВВЕДЕНИЕ

Участие озона в важных атмосферных процессах стимулировало создание различных систем его мониторинга. Общее содержание озона (ОСО) и его вертикальные профили измеряются с помощью различных наземных и спутниковых методов (Тимофеев, 1989; Hassler et al., 2014). В России до недавнего времени отсутствовала космическая система контроля состояния озоносферы. На борту российского метеорологического спутника “Метеор-М” № 2, запущенного в июле 2014 г., одним из основных приборов для зондирования атмосферы является Фурье-спектрометр ИКФС-2. Прибор измеряет спектры уходящего теплового излучения в ИК-области спектра и предназначен для получения информации об атмосфере и поверхности для численных прогнозов погоды и изучения современных изменений климата Земли (Головин и др., 2013; Поляков и др., 2016; Асмус и др., 2017). Спектральная область измерений ( $660\text{--}2000\text{ см}^{-1}$ ) позволяет измерять вертикальные профили температуры и влажности, температуру поверхности и общее содержание озона. Реализуемый с помощью ИКФС-2 надирный ИК-метод теплового излучения позволяет в любые сезоны и время суток, в том числе

в период полярной ночи, получать непрерывные поля распределения озона с относительно высоким горизонтальным разрешением.

В работе (Гаркуша и др., 2017) описана и проанализирована методика интерпретации спектральных измерений ИКФС-2 для получения ОСО в условиях безоблачной атмосферы. В данной работе та же задача решается для произвольного облачного состояния атмосферы, что принципиально важно, так как в 50–70% случаев в поле зрения спутниковых приборов находятся облачные образования (King et al., 2013).

## МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ И СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ С НЕЗАВИСИМЫМИ ДАННЫМИ

Методика интерпретации, основанная на методе искусственных нейронных сетей (ИНС), подробно описана в работе (Гаркуша и др., 2017). Используется аппроксимация решающего оператора обратной задачи трехслойным перцептроном, функция активации нейронов скрытого слоя – гиперболический тангенс, выходного нейрона – линейная. Основной особенностью методики

Таблица 1. Сравнения ОСО по измерениям ИКФС-2 и ОМІ для 2016 г.

Мес.	январь–февраль			март–май			июнь–август			сентябрь–ноябрь		
	R	CP,%	COP, %	R	CP, %	COP, %	R	CP, %	COP, %	R	CP, %	COP, %
Широтный пояс, град												
60–90 с.ш.	0.99	-0.06	3.4	0.94	0.83	3.4	0.90	1.5	3.4	0.84	1.2	4.2
30–60 с.ш.	0.99	0.08	2.9	0.95	0.00	3.5	0.93	0.98	3.0	0.93	-0.68	3.1
30 ю.ш.— 30 с.ш.	0.94	-0.14	1.7	0.96	-0.01	1.8	0.93	0.21	2.1	0.86	-0.60	1.9
30–60 ю.ш.	0.90	0.78	2.9	0.93	0.89	4.0	0.91	0.52	4.9	0.97	-0.31	4.2
60–90 ю.ш.	0.75	0.34	3.2	0.79	1.9	6.0	0.91	-0.41	7.6	0.98	3.1	10.9

является использование в качестве предикторов не самих спектров, измеренных ИКФС-2, а коэффициентов их разложения по эмпирическому ортогональному базису (ЭОБ), так называемых главных компонент (ГК). Набор предикторов состоит из 25 ГК всего измеряемого спектра, 50 ГК – только полосы поглощения озона и зенитного угла, под которым спутник виден из наблюдаемого участка поверхности. Для обучения ИНС использовались результаты измерений ОСО с помощью прибора ОМІ с борта спутника AURA (McPeters et al., 2015). ОМІ измеряет интенсивность рассеянного солнечного излучения в спектральной области 264–504 нм, имеет горизонтальное разрешение 13×24 км<sup>2</sup>; погрешность измерений ОСО составляет 1–2%. Принципиальное отличие настоящей работы – использование для обучения полной выборки, включающей наряду с безоблачными и все измерения в присутствии облачности. Исходный массив данных для построения обучающей выборки (данные ИКФС-2 и ОМІ) и пространственно-временной критерий согласования измерений двух приборов (расстояние не более 35 км и тот же день измерений) оставлены без изменений. В результате ансамбль, на котором обучалась ИНС, содержал более 600 тыс. спектров, измеренных прибором ИКФС-2 в 2015 г. Из них 70% использовалось для обучения, 15% и 15% – в качестве тестовой и валидационной выборки.

В табл. 1 представлены результаты сравнения значений ОСО, полученных по предлагаемой методике, с данными ОМІ для 2016 г. для различных широт и сезонов. В ней приведены коэффициенты корреляции между ОСО, полученными двумя приборами, средние разности (CP) и стандартные отклонения разностей (COP), в процентах, для разных сезонов и широтных зон.

Результаты табл. 1 показывают, что решающий оператор, построенный по данным 2015 г.,

позволяет в 2016 г. получать ОСО согласующиеся с измерениями ОМІ со значениями CP в диапазоне 0.06–3.4% и COP- в диапазоне 1.7–10.9%. При этом COP имеет выраженные сезонную и широтную зависимости. В январе и феврале для всех широтных поясов COP минимально и составляет 1.7–3.4%. Максимальные COP

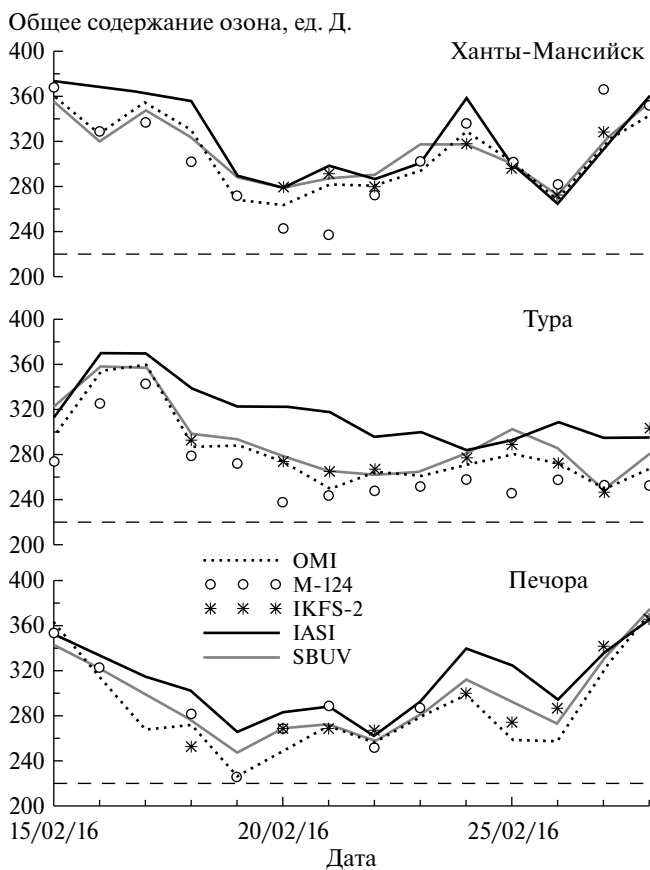


Рис. 1. Измерения ОСО различными приборами. Штриховой линией обозначен уровень ОСО, определяемый как озоновая “мини-дыра”.

**Таблица 2.** Сравнение с наземными измерениями тремя приборами (Dobson, Brewer, M-124) для 2015 и 2016 гг. *N* – количество измерений

Год	2015			2016		
	Dobson	Brewer	M-124	Dobson	Brewer	M-124
Прибор						
<i>N</i>	122	144	74	87	102	7
<i>R</i>	0.97	0.98	0.97	0.95	0.97	0.98
СР, %	0.03	0.87	1.3	-0.26	1.6	3.8
СОР, %	3.4	3.9	4.3	4.2	3.8	3.1

наблюдаются для широтного пояса 60–90 ю.ш. и достигают 6.0–10.9% для периодов с марта до ноября. Коэффициенты корреляции *R* в большинстве случаев близки или превышают 0.90. Исключения наблюдаются для широтного пояса 60–90 ю.ш., где для ряда сезонов величины *R* заметно меньше. Подобный рост СОР и спад корреляций в этой географической зоне наблюдались и для прибора IASI, близкого по своим характеристикам к ИКФС-2 (Boynard et al., 2016). Последнее объясняется тем, что погрешности определения ОСО рассматриваемым методом существенно зависят от вертикального градиента температуры в атмосфере, и в случае изотермической системы атмосфера–поверхность и абсолютно черной поверхности определение ОСО становится невозможным. Близкое к описанным состояние атмосферы и поверхности наблюдается над Антарктидой.

Важный вывод из проведенных исследований – обратный оператор задач, построенный на данных 2015 г., позволяет получать значения ОСО в 2016 г., как правило, по-прежнему с высокой точностью.

В табл. 2 представлены результаты сопоставления ОСО, восстановленных по измерениям ИКФС-2, с данными различных наземных измерений озонометрической сети WOUDC (World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre) для 2015 и 2016 гг. по отдельности. Поиск пар сравнений проводился в кругах радиусом 100 км, временное согласие – тот же день измерений по UTC.

Из приведенных данных следует, что коэффициенты корреляции между спутниковыми (прибор ИКФС-2) и наземными (приборы Добсон, Брюер, M-124) измерениями очень высоки как в 2015, так и в 2016 гг. (0.95–0.98), СР данных различных измерений в большинстве случаев не превышают 2%, а СОР составляют ~3–4%. Заметные СР наблюдаются только в 2016 г. при сравнении с озонометром M-124 – 3.8%.

## АНАЛИЗ ОЗОНОВЫХ МИНИ-ДЫР

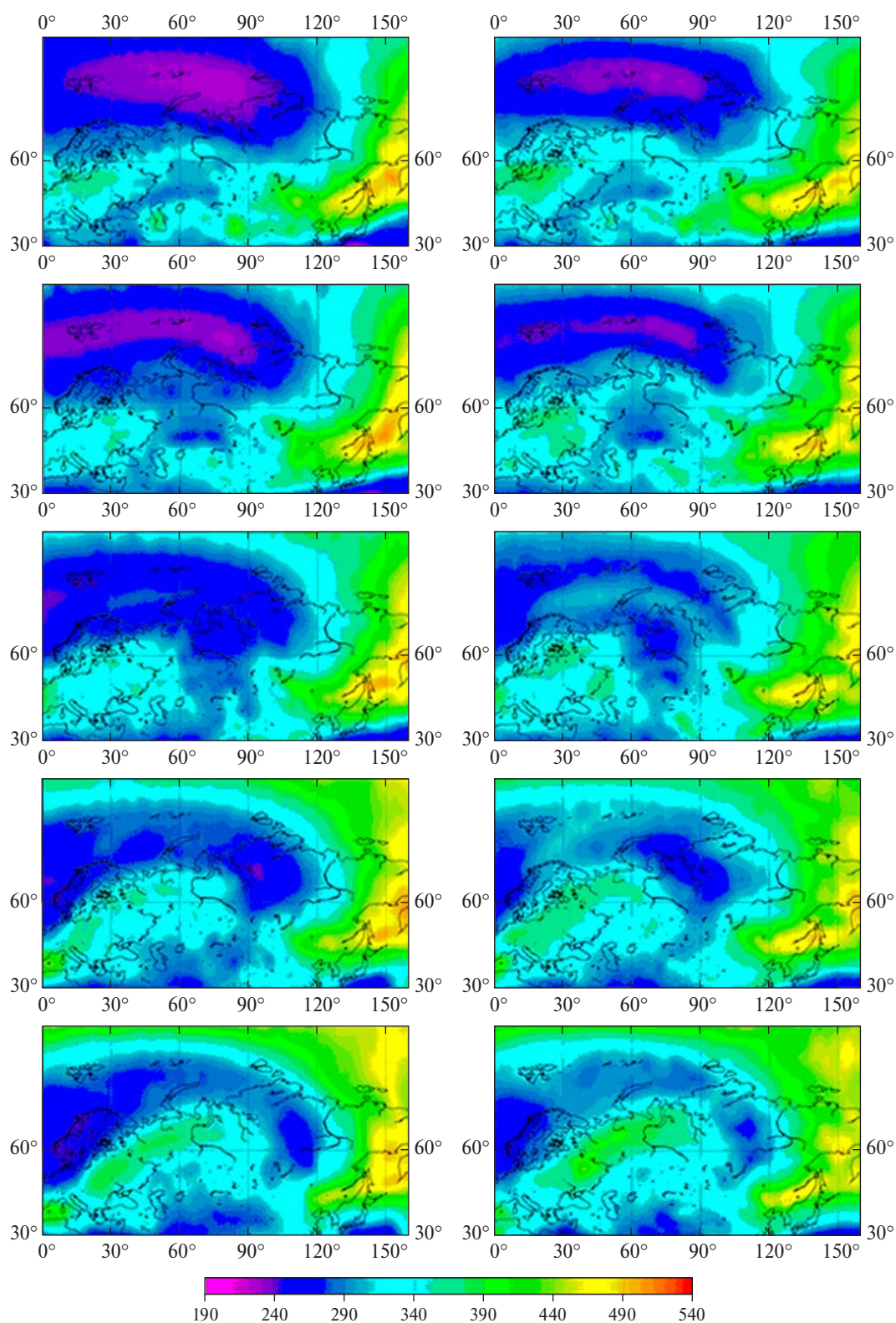
В первом квартале 2016 г. над территорией России наблюдались так называемые “озоновые мини-дыры” (Звягинцев и др., 2016). Разработанная методика интерпретации измерений ИКФС-2 позволила изучить эти явления.

Мы сопоставили значения ОСО, полученные с помощью наземных измерений стандартными озонометрами M-124, а также спутниковых данных приборов OMI, SBUV (регистрирующих спектры уходящего отраженного и рассеянного солнечного УФ-излучения), IASI и ИКФС-2 (измеряющих уходящее тепловое ИК-излучение) в первом квартале 2016 г. На рис. 1 для трех станций наблюдений – Тура (64° с.ш., 100° в.д.), Печора (65° с.ш., 57° в.д.) и Ханты-Мансийск (61° с.ш., 69° в.д.) указан временной ход ОСО по данным измерений этими приборами.

Проведенные сопоставления позволяют сделать следующие основные выводы:

– Все приборы и методы измерений в целом достаточно хорошо описывают основные особенности временных вариаций ОСО, в том числе наблюдавшиеся минимумы ОСО. Для всего периода сопоставлений СР результатов различных типов измерений ОСО в большинстве случаев составляют от 1 до 5%, СОР от 3 до 8%.

– Спутниковые данные завышают значения ОСО по сравнению с наземными измерениями в периоды минимумов ОСО. Это обусловлено тем, что при решении соответствующих обратных задач спутникового зондирования решение находится с привлечением априорной информации в явной или неявной форме. В частности, при использовании метода ИНС априорная информация вносится использованной для обучения выборкой. Поэтому для аномальных состояний атмосферы, подобных “мини-дырам” 2016 г., закономерно возможен рост погрешности.



**Рис. 2.** Распределения ОСО над Евразией в период 23–27 (сверху вниз) февраля 2016 г. по данным измерений – ИКФС-2 (справа) и IASI (слева).

На рис. 2 приведены пространственные распределения ОСО в период 23–27 февраля 2016 г. по данным измерений двух приборов одного типа – ИКФС-2 и IASI.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные характеристики сравнений различных измерений ОСО демонстрируют высокое качество разработанной методики измерений ОСО с помощью прибора ИКФС-2 в облачных условиях. Этот вывод основан на том, что сами разнообразные измерения выполняются при наличии случайных и систематических погрешностей спутниковых и наземных измерений. Так, например, в работе (Виролайнен и др., 2017) показано, что случайные погрешности измерения ОСО прибором IASI составляет  $2.9 \pm 0.5\%$ , M-124 –  $2.8 \pm 0.7\%$ , OMI –  $1.2 \pm 0.2\%$ . При использовании спектрометра Добсона в качестве эталона измерений ОСО оказалось, что СР максимален для прибора IASI (2.1%), а для прибора OMI они составляет 1.7%. Наконец, полные погрешности (среднеквадратические разности данных двух приборов) минимальны для прибора OMI (~2%), а измерения IASI имеют полные погрешности 3.2–4.1%.

Если сравнить цифры, приведенные в табл. 1 и 2, с рассогласованиями для случаев безоблачной атмосферы (Гаркуша и др., 2017), то можно отметить, что рассогласования данных ИКФС-2 как с OMI, так и с наземными измерениями для условий облачной атмосферы в среднем больше на 0.5–1.5%.

Исключения наблюдаются только для широтного пояса  $60^\circ$ – $90^\circ$  ю.ш. в период сентябрь–ноябрь 2016 г., когда рост СОР составляет ~5%. Последнее, вероятно, связано с наличием в этот период «озоновых дыр» и соответственно неадекватностью априорной статистики, использованной при построении решающего оператора. В дальнейшем планируется переобучение ИНС для указанного широтного пояса и сезона на адекватных данных.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Разработана методика определения ОСО по измерениям спектров уходящего теплового ИК-излучения прибором ИКФС-2 (МИСЗ «Метеор-М» № 2) при наличии облачности в поле зрения прибора. Методика основана на методе ИНС и использовании высококачественных измерений ОСО спутниковым прибором OMI.

1. Проведена массовая интерпретация данных измерений прибора ИКФС-2 в период 2015–2016 гг. и получена новая информация о вариациях ОСО в глобальном масштабе.

2. Сравнения с независимыми спутниковыми (прибор OMI) и наземными измерениями (приборы Добсона, Брюера, M-124) показали, что данные измерений спутникового прибора ИКФС-2

согласуются с ними в среднем в пределах 3–10% в зависимости от широтного пояса и сезона.

3. Существенная зависимость различий данных ОСО по различным измерениям от широты и сезона показала целесообразность анализа погрешностей при обучении ИНС для отдельных широтных зон и сезонов. Такой анализ будет особенно актуален для полярных широт и областей формирования «озоновых дыр», в частности, в Антарктиде, где разности данных ИКФС-2 и результатов независимых измерений могут достигать ~10%.

4. На основе интерпретации измерений ИКФС-2 с помощью разработанной методики подтверждено наличие пониженных значений ОСО над территорией России (озоновые мини-дыры). Показана временная динамика пространственного поля ОСО в феврале 2016 г. Данные спутниковых измерений хорошо согласуются с результатами наземных измерений.

Исследования, проведенные в СПбГУ, были профинансированы из гранта РНФ № 14-17-00096.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Асмус В.В., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Успенский А.Б., Головин Ю.М., Завелевич Ф.С., Козлов Д.А., Рублев А.Н., Кухарский А.В., Пяткин В.П., Русин Е.В. Температурное зондирование атмосферы по данным спутникового ИК Фурье-спектрометра ИКФС-2 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. № 5. С. 487–492.
- Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Поляков А.В., Шаламянский А.М. Эмпирические оценки погрешностей измерений общего содержания озона различными методами и приборами // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 2. С. 170–176.
- Гаркуша А.С., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А. Определение общего содержания озона по данным измерений спутникового ИК Фурье-спектрометра ИКФС-2 (МИСЗ «Метеор-М» № 2) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. № 4. С. 493–501.
- Головин Ю.М., Завелевич Ф.С., Никулин А.Г., Козлов Д.А., Монахов Д.О., Козлов И.А., Архипов С.А., Целиков В.А., Романовский А.С. Бортовые инфракрасные Фурье-спектрометры для температурно-влажностного зондирования атмосферы Земли // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 6. С. 25–37.
- Звягинцев А.М., Иванова Н.С., Никифорова М.П., Кузнецова И.Н., Варгин П.Н. Содержание озона над территорией Российской Федерации в первом квартале 2016 г. // Метеорология и гидрология. 2016. № 5. С. 122–128.
- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Успенский А.Б., Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Козлов Д.А., Рублев А.Н., Кухарский А.В. Спутниковый атмосферный зондировщик ИКФС-2 1. Анализ измерений спектров

уходящего излучения // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 5. С. 71–78.

Тимофеев Ю.М. Спутниковые методы исследования газового состава атмосферы // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1989. Т. 25. № 5. С. 451–472.

Boynard A., Hurtmans D., Koukouli M.E., Goutail F., Bureau J., Safieddine S., Lerot C., Hadji-Lazaro J., Pommereau J.-P., Pazmino A., Zyrichidou I., Balis D., Barbe A., Mikhailenko S.N., Loyola D., Valks P., Roozendael M.V., Coheur P.-F., Clerbaux C. Seven years of IASI ozone retrievals from FORLI: validation within dependent total column and vertical profile measurements // *Atm. Meas. Tech. Disc.* 2016. DOI: 10.5194/amt-2016–11.

Hassler B., Petropavlovskikh I., Staehelin J., August T., Bhartia P.K., Clerbaux C., Degenstein D., De Mazière M., Dinelli B.M., Dudhia A., Dufour G., Frith S.M., Froidevaux L., Godin-Beekmann S., Granville J., Harris N.R.P., Hoppel K.,

Hubert D., Kasai Y., Kurylo M.J., Kyrölä E., Lambert J.-C., Levelt P.F., McElroy C.T., McPeters R.D., Munro R., Nakajima H., Parrish A., Raspollini P., Remsberg E.E., Rosenlof K.H., Rozanov A., Sano T., Sasano Y., Shiotani M., Smit H.G.J., Stiller G., Tamminen J., Tarasick D.W., Urban J., van der A R.J., Veefkind J.P., Vigouroux C., von Clarmann T., von Savigny C., Walker K.A., Weber M., Wild J., Zawodny J.M. Past changes in the vertical distribution of ozone / Pt. 1: Measurement techniques, uncertainties and availability // *Atm. Meas. Techn.* 2014. V. 7. P. 1395–1427.

King M.D., Platnick S., Menzel W.P., Ackerman S.A., Hubanks P.A. Spatial and temporal distribution of clouds observed by MODIS onboard the Terra and Aqua satellites // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2013. V. 51. № 7. P. 3826–3852.

McPeters R.D., Frith S., Labow G.J. OMI total column ozone: extending the long-term data record // *Atm. Meas. Techn.* 2015. V. 8. P. 4845–4850.

## Retrieval of the Total Ozone Content under Cloudiness from Data of IRFS-2 Spectrometer Onboard «Meteor-M» № 2 Satellite

A. S. Garkusha<sup>1</sup>, A. V. Polyakov<sup>1\*</sup>, Yu. M. Timofeev<sup>1</sup>, Ya. A. Virolainen<sup>1</sup>, A. V. Kukharsky<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint-Petersburg State University

<sup>2</sup> State Research Center of Space Hydrometeorology “Planeta”, Moscow

\*E-mail: a.v.polyakov@spbu.ru

The new technique for retrieving the total ozone content (TOC) under cloudiness from spectra of outgoing thermal IR radiation measured by satellite IRFS-2 device is developed. The analysis of errors of the developed technique has shown that differences between the retrieved TOC and independent satellite (OMI) and ground-based (Dobson, Brewer, M-124 devices) measurements, as a rule, are 3–5%. The greatest differences (to 10%) are observed in the southern polar latitudes in the presence of an ozone hole over Antarctica. The IRFS-2 device has allowed to studying the ozone mini-holes over Russia in the first quarter of 2016. Data of measurements show almost 2-fold TOC decrease in separate days.

**Keywords:** ozonosphere, remote sensing under cloudiness, total ozone, Meteor-M № 2, IRFS-2 device, validation

### REFERENCES

Asmus V.V., Timofeyev Yu.M., Polyakov A.V., Uspenskiy A.B., Golovin Yu.M., Zavelevich F.S., Kozlov D.A., Rublev A.N., Kukharskiy A.V., Pyatkin V.P., Rusin Ye.V. Temperaturnoye zondirovaniye atmosfery po dannym sputnikovogo IK fur’ye-spektrometra IKFS-2 [Temperature sounding of the atmosphere according to the satellite IR Fourier spectrometer of IKFS-2] // *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana.* 2017. № 5. S. 487–492. (In Russian).

Boynard A., Hurtmans D., Koukouli M.E., Goutail F., Bureau J., Safieddine S., Lerot C., Hadji-Lazaro J., Pommereau J.-P., Pazmino A., Zyrichidou I., Balis D., Barbe A., Mikhailenko S.N., Loyola D., Valks P., Roozendael M.V., Coheur P.-F., Clerbaux C. Seven years of IASI ozone retrievals

from FORLI: validation with independent total column and vertical profile measurements // *Atm. Meas. Techn. Disc.* 2016. DOI: 10.5194/amt-2016–11.

Garkusha A.S., Polyakov A.V., Timofeyev Yu.M., Virolaynen Ya.A. Opredeleniye obshchego sodержaniya ozona po dannym izmereniy sputnikovogo IK Fur’ye-spektrometra IKFS-2 (MISZ “Meteor-M” № 2) [Determination of the total ozone content from measurements of the IRFFS-2 satellite FTIR spectrometer (MISP “Meteor-M” № 2)] // *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana.* 2017. № 4. S. 493–501. (In Russian).

Golovin Yu.M., Zavelevich F.S., Nikulin A.G., Kozlov D.A., Monakhov D.O., Kozlov I.A., Arkhipov S.A., Tselikov V.A., Romanovskiy A.S. Bortovyye infrakrasnyye Fur’ye-spektrometry dlya temperaturno-vlazhnostnogo zondirovaniya atmosfery Zemli [Onboard infrared Fourier spectrometers for

- temperature-humidity sounding of the Earth's atmosphere] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2013. № 6. S. 25–37. (In Russian).
- Hassler B., Petropavlovskikh I., Staehelin J., August T., Bhartia P.K., Clerbaux C., Degenstein D., De Mazière M., Dinelli B.M., Dudhia A., Dufour G., Frith S.M., Froidevaux L., Godin-Beekmann S., Granville J., Harris N.R.P., Hoppel K., Hubert D., Kasai Y., Kurylo M.J., Kyrölä E., Lambert J.-C., Levelt P.F., McElroy C.T., McPeters R.D., Munro R., Nakajima H., Parrish A., Raspollini P., Remsberg E.E., Rosenlof K.H., Rozanov A., Sano T., Sasano Y., Shiotani M., Smit H.G.J., Stiller G., Tamminen J., Tarasick D.W., Urban J., van der A R.J., Veefkind J.P., Vigouroux C., von Clarmann T., von Savigny C., Walker K.A., Weber M., Wild J., Zawodny J.M.* Past changes in the vertical distribution of ozone / Pt. 1: Measurement techniques, uncertainties and availability // *Atm. Meas. Techn.* 2014. V. 7. P. 1395–1427.
- King M.D., Platnick S., Menzel W.P., Ackerman S.A., Hubanks P.A.* Spatial and temporal distribution of clouds observed by MODIS onboard the Terra and Aqua satellites // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2013. V. 51. № 7. P. 3826–3852.
- McPeters R.D., Frith S., Labow G.J.* OMI total column ozone: extending the long-term data record // *Atm. Meas. Techn.* 2015. V. 8. P. 4845–4850.
- Polyakov A.V., Timofeyev Yu.M., Virolaynen Ya.A., Uspenskiy A.B., Zavelevich F.S., Golovin Yu.M., Kozlov D.A., Rublev A.N., Kukharskiy A.V.* Sputnikovyy atmosfernyy zondirovshchik IKFS-2 1. Analiz izmereniy spektrov ukhodyashchego izlucheniya [Satellite atmospheric sounder IRCS-2 1. Analysis of measurements of outgoing radiation spectra] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2016. № 5. S. 71–78. (In Russian).
- Timofeyev Yu.M.* Sputnikovyie metody issledovaniya gazovogo sostava atmofery [Satellite Methods for Investigating the Gas Composition of the Atmosphere] // *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*. 1989. T. 25. № 5. S. 451–472. (In Russian).
- Virolaynen Ya.A., Timofeyev Yu.M., Poberovskiy A.V., Polyakov A.V., Shalamyanskiy A.M.* Empiricheskiye otsenki pogreshnostey izmereniy obshchego sodержaniya ozona razlichnymi metodami i priborami [Empirical estimates of errors in measurements of the total ozone content by various methods and instruments] // *Optika atmosfery i okeana*. 2017. T. 30. № 2. S. 170–176. (In Russian).
- Zvyagintsev A.M., Ivanova N.S., Nikiforova M.P., Kuznetsova I.N., Vargin P.N.* Soderzhaniye ozona nad territoriyey Rossiyskoy Federatsii v pervom kvartale 2016 g. [Ozone content over the territory of the Russian Federation in the first quarter of 2016] // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2016. № 5. S. 122–128. (In Russian).