

УДК 551.510.41

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ СПУТНИКОВОГО ИК ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРА

© 2017 А. С. Гаркуша, А. В. Поляков*, Ю. М. Тимофеев,
Я. А. Виролайнен

*Санкт-Петербургский государственный университет
199034 Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9*

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

Поступила в редакцию 24.05.2016 г.

После доработки 07.07.2016 г.

Приведены примеры восстановления общего содержания озона (ОСО) по спектрам уходящего теплового излучения, измеренным с помощью прибора ИКФС-2 с борта метеорологического искусственного спутника Земли (МИСЗ) “Метеор-М” № 2. Применена разработанная авторами методика, основанная на нейронно-сетевом подходе с использованием данных измерений ОСО с помощью спутникового прибора OMI. Сравнение полученных результатов с данными независимых измерений ОСО показало их согласие в пределах 2–5% для глобального ансамбля и в пределах 3–6% для отдельных широтных поясов и сезонов. Оценки погрешностей измерений ОСО на ИКФС-2 близки к погрешностям измерений ОСО с помощью аналогичного прибора IASI со спутника MetOp (EUMETSAT).

Ключевые слова: озоносфера, дистанционное зондирование, общее содержание озона, Метеор-М № 2, ИКФС-2.

DOI: 10.7868/S0003351517040079

1. ВВЕДЕНИЕ

Озон является одной из важнейших газовых составляющих атмосферы. Он участвует в нагревании стратосферы, дает вклад в парниковый эффект в тропосфере, а при высокой концентрации в приземном слое атмосферы он токсичен [1]. Существуют наземная и космическая системы мониторинга озона на региональном и глобальном масштабах. Значительное количество информации о содержании озона в настоящее время получают с помощью трех методов пассивного зондирования со спутников: затменного метода и методов, использующих собственное излучение атмосферы или рассеянное солнечное излучение [2, 3]. Мониторинг содержания озона из космоса осуществляется с использованием аппаратуры ACE-FTS (затменный метод), приборов TOMS, SBUV, OMI и GOME-2 (по рассеянному солнечному излучению) и приборов IASI, CrIS, TES и MLS (по тепловому излучению атмосферы) [3]. Каждый из этих методов и приборов имеет свои преимущества и недостатки, но в совокупности они позволяют в значительной степени удовлетворить современным требованиям, предъявляемым к точности озонных измерений, их периодичности и пространственному разрешению.

До недавнего времени в России отсутствовала космическая система контроля состояния озоносферы. В июле 2014 г. был запущен новый российский метеорологический спутник “Метеор-М” № 2, на борту которого находится разнообразная аппаратура для дистанционного зондирования атмосферы и поверхности Земли. Основным прибором спутника служит Фурье-спектрометр ИКФС-2, предназначенный для получения информации об атмосфере и земной поверхности для целей численного прогноза погоды и изучения современного изменения климата Земли [4, 5]. Анализ качества измерений на этом приборе и первые результаты температурного зондирования атмосферы обсуждаются в работах [6, 7]. Наша работа посвящена описанию алгоритма и анализу погрешностей восстановления общего содержания озона (ОСО) с помощью метода теплового излучения по данным прибора ИКФС-2.

Отметим, что важное преимущество надирного ИК-метода теплового излучения состоит в том, что он применим в любое время суток и позволяет получать огромное количество информации с относительно высоким горизонтальным разрешением. К недостаткам метода следует отнести его ограниченную информативность относительно высотного

распределения озона и зависимость погрешностей определения ОСО от вертикального температурно-градиента и облачности.

2. МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

ИКФС-2 измеряет спектры уходящего теплового излучения в широкой спектральной области ($660\text{--}2000\text{ см}^{-1}$), включающей полосу поглощения озона 9.6 мкм , со спектральным разрешением 0.7 см^{-1} и погрешностью измерений, определяемой как NESR (noise equivalent spectral radiation, эквивалентная шуму интенсивность излучения), $0.14\text{--}0.25\text{ мВт}/(\text{м}^2\text{ ср см}^{-1})$ в ней. Измерения в этой полосе поглощения успешно используются для мониторинга состояния озоносферы за рубежом (приборы AIRS и IASI)[8, 9]. Анализ погрешностей измерений содержания различных газов, в том числе ОСО, на ИКФС-2 содержится в [10, 11]. В работе [11] оценена нижняя граница погрешностей, которая составила для ОСО 0.6% . В [10] на основе численного моделирования получены оценки погрешностей $1.6\text{--}5\%$ в зависимости от широтной зоны.

Измеряемые функционалы уходящего теплового ИК излучения в полосе озона 9.6 мкм зависят от ряда параметров атмосферы и земной поверхности: вертикальных профилей температуры, влажности, содержания озона и других поглощающих газов и аэрозоля, температуры подстилающей поверхности, характеристик облачности и т.п. [12]. Поэтому определение содержания озона в атмосфере в общем случае требует решения комплексной обратной задачи с учетом (исключением) вариаций уходящего излучения, связанных с этими параметрами и выделением вклада в эти вариации озона. Для решения такой задачи часто используются физико-математический подход (решение нелинейного интегрального уравнения, сформулированного на основе уравнения переноса теплового излучения) или различные регрессионные алгоритмы. В настоящее время существуют спутниковые приборы, измеряющие ОСО с хорошим горизонтальным разрешением и высокой точностью, аппроксимация результатов измерений которых может быть использована в качестве решающего алгоритма. В настоящей работе использовались данные уровня трёх измерений с помощью прибора OMI с борта спутника AURA[13]. OMI измеряет интенсивность рассеянного солнечного излучения в спектральной области $264\text{--}504\text{ нм}$, имеет полосу обзора шириной 2600 км , горизонтальное разрешение $13 \times 24\text{ км}^2$; погрешность измерений ОСО составляет $1\text{--}2\%$. Отметим, что пространственное разрешение ИКФС-2 в надире составляет $\sim 35\text{ км}$ и близко к разрешению OMI. Данные OMI неоднократно валидировались, и методика восстановления ОСО

совершенствовалась. Отметим, что использование этих данных при построении обратного оператора для интерпретации измерений на ИКФС-2 позволяет автоматически осуществлять калибровку российской системы мониторинга ОСО по данным существующих международных систем.

Для решения обратной задачи использовалась методика на основе метода искусственных нейронных сетей (ИНС). Обучение сети и расчеты выполнялись в программной среде MATLAB. В качестве ИНС использовался трехслойный перцептрон с функцией активации гиперболический тангенс для нейронов скрытого слоя и линейной функцией для нейронов выходного слоя.

Для построения ИНС были сформированы ансамбли данных (спектры, полученные на приборе ИКФС-2, и результаты измерений ОСО с помощью прибора OMI) для обучения, тестирования и проверки качества обратного оператора (объем учебника – 190371 измерение (или 60% от общего объема), валидационная и тестовая выборки содержали по 63463 измерения, или 20% общего объема. Период измерений – с марта по ноябрь 2015 г., использованы лишь данные измерений в безоблачных условиях. В ансамбли данных ИКФС-2 и OMI включались попарно лишь те, для которых расстояния между центрами соответствующих пикселей не превышало 35 км . Поскольку измерения с помощью прибора OMI выполняются при наличии солнечного излучения, использовались лишь дневные данные измерений на ИКФС-2.

При обучении ИНС использовались не сами спектры уходящего теплового излучения, а их разложения по эмпирическому ортогональному базису. При этом использовались 25 главных компонент эмпирических ковариационных матриц уходящего излучения во всей спектральной области измерений на приборе ИКФС-2 с целью учета вариаций параметров атмосферы и земной поверхности и 50 главных компонент в полосе озона ($1000\text{--}1200\text{ см}^{-1}$).

3. СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ ИКФС-2 С ДАННЫМИ НЕЗАВИСИМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

При сопоставлении результатов измерений будем рассматривать среднюю разность (СР), стандартное отклонение разности (СОР), среднеквадратичную разность (СКР) и коэффициент корреляции (КК) R.

В табл. 1 приведены значения СР и СОР между значениями ОСО по данным измерений с помощью приборов ИКФС-2 и OMI (значение ОСО по данным ИКФС-2 минус значение ОСО по данным OMI) по сезонам в широтных поясах. Используются те же критерии отбора, что и при

построении обучающих ансамблей. На рис. 1 представлены результаты сопоставления для глобального ансамбля. СР и СКР составили 0.1% и 2.8% соответственно.

Как следует из табл. 1, СР для глобального ансамбля составляет 0.1%, а СОР для разных сезонов заключена в диапазоне 2.1–3.1%. Минимальные значения СОР свойственны лету. Имеется широтная зависимость СР и СОР: их максимальные значения отмечены для полярных широт, достигая в Южном полушарии значений 0.8 и 5.7% соответственно. Значения СОР в северных полярных широтах достигают 3.2–3.3%. В средних широтах и в тропиках значения СОР, как правило, меньше и составляют 1.5–3%. Следует отметить, что расхождения между данными двух приборов обусловлены погрешностями тех и других. При этом коэффициенты корреляции между данными составляют 0.86–0.99. Все значения СР в табл. 1 статистически значимы, исключая южную полярную область летом, ансамбль данных об ОСО для которой включает лишь шесть пар значений. Отметим, что сравниваемые дистанционные методы измерения ОСО работают в разных спектральных областях (УФ и ИК) и основаны на различных физических принципах дистанционных измерений.

Данные измерений ОСО с помощью прибора ИКФС-2 были также сопоставлены с данными спутниковых измерений с помощью прибора GOME-2. Прибор GOME-2 измеряет интенсивность рассеянного солнечного излучения в спектральной области 240–790 нм, с горизонталь-

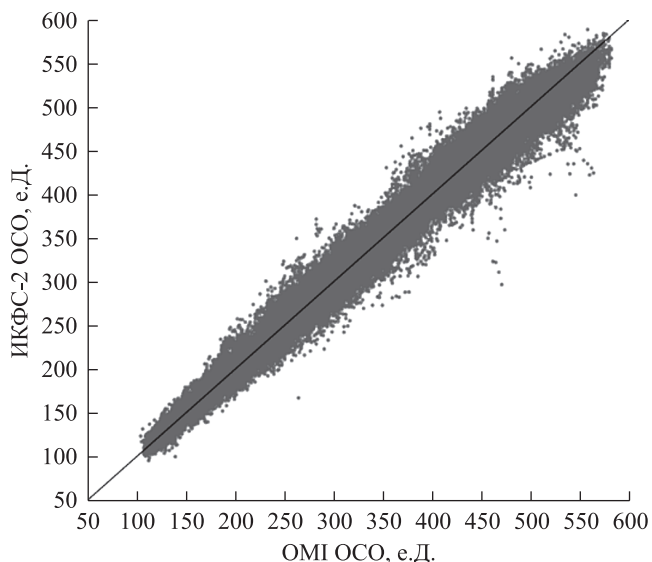


Рис. 1. Сравнение ОСО по данным спутниковых приборов ОМІ и ИКФС-2.

ным разрешением $80 \times 40 \text{ км}^2$, несколько более грубым, чем разрешение ИКФС-2. О качестве данных измерений на этом приборе можно судить на основе их сравнения с данными наземных измерений на спектрофотометрах Добсона и Брюера. Значения СР заключены в диапазоне от -2.1 до 0.7% (спутниковые измерения, как правило, занижают ОСО по сравнению с наземными) и СОР в пределах $2.4\text{--}4.0\%$ [14] (использовались те же критерии отбора пар данных, что и выше).

Таблица 1. Характеристики сопоставления данных измерений ОСО с помощью приборов ИКФС-2 и ОМІ с 95%-ными доверительными интервалами

Широта	Март–Май			Июнь–Август			Сентябрь–Ноябрь		
	R	СР, %	СОР, %	R	СР, %	СОР, %	R	СР, %	СОР, %
60°–90° N	0.96	0.02 ±0.03*	3.2	0.96	0.08 ±0.04*	2.4	0.94	0.18 ±0.05*	3.3
30°–60° N	0.98	-0.16 ±0.03*	2.3	0.97	-0.12 ±0.04*	2.0	0.97	-0.01 ±0.03*	2.1
30° S – 30° N	0.98	0.03 ±0.01*	1.5	0.98	0.24 ±0.03*	1.5	0.93	0.01 ±0.01*	1.6
30°–60° S	0.91	0.72 ±0.07*	3.1	0.93	-0.48 ±0.18*	3.4	0.89	0.24 ±0.08*	3.6
60°–90° S	0.86	0.82 ±0.10*	5.1	0.96	-0.13 ±6.52*	5.7	0.97	0.29 ±0.07*	5.4
Все широты	0.99	0.07 ±0.01*	2.7	0.98	0.06 ±0.02*	2.1	0.99	0.10 ±0.02*	3.1

Примечания. R – коэффициент корреляции. * – доверительный интервал при 95%-ной достоверности.

Таблица 2. Характеристики сопоставления данных измерений ОСО с помощью приборов ИКФС-2 и GOME-2 с 95%-ными доверительными интервалами

	Март–Май			Июнь–Август			Сентябрь– Ноябрь		
	R	CP, %	COP, %	R	CP, %	COP, %	R	CP, %	COP, %
60°–90° N	0.94	0.75 ±0.04*	3.7	0.96	–1.79 ±0.05*	2.3	0.93	–1.29 ±0.07*	3.3
30°–60° N	0.95	1.55 ±0.09*	3.9	0.97	–1.85 ±0.09*	2.1	0.97	–0.21 ±0.04*	1.8
30° S – 30° N	0.86	0.77 ±0.12*	4.5	0.99	–2.30 ±0.08*	1.3	0.94	–0.74 ±0.02*	1.3
30°–60° S	0.87	0.65 ±0.24*	5.0	0.90	–5.36 ±0.93*	5.1	0.95	–1.86 ±0.10*	2.5
60°–90° S	0.86	–1.03 ±0.15*	4.8	–	–	–	0.97	–2.00 ±0.11*	6.3
Все широты	0.98	0.73 ±0.03*	4.0	0.97	–1.88 ±0.04*	2.3	0.99	–1.16 ±0.04*	3.9

Примечания. R – коэффициент корреляции. * – доверительный интервал при 95%-ной достоверности.

В табл. 2 приведены статистические характеристики сравнения данных измерений ОСО с помощью приборов ИКФС-2 и GOME-2.

Значения CP для глобального ансамбля заключены в пределах от –1.9 до 0.7%, а значения COP – в пределах от 2.3 до 4.0%. Для различных широтных поясов значения CP варьируют от –5.4 до 1.6%, причем ИКФС-2, как правило, дает меньшие значения ОСО. Значения COP находятся в диапазоне 1.3–6.3%, что несколько превышает значения COP в табл. 1. Возможно, это обусловлено различием горизонтальных разрешений приборов.

Коэффициенты корреляции между данными ИКФС-2 и GOME-2 находятся в диапазоне 0.86–0.99. Отметим, что наилучшее согласие получено для лета в северном полушарии (COP 1.3–2.3%). Приведенные в табл. 2 значения CP статистически значимы.

В табл. 3 приведены характеристики сопоставления результатов измерений на ИКФС-2 ОСО с данными наземных измерений с помощью спектрофотометров Добсона и Брюера и фильтрового фотометра M-124 (наземные данные минус данные ИКФС-2). Пары данных отбирались из условия,

Таблица 3. Характеристики сопоставления данных измерений ОСО с помощью прибора ИКФС-2 с данными наземных измерений

Приборы	Брюер	Добсон	M-124
<i>N</i>	129	111	236
<i>R</i>	0.98	0.98	0.96
CP (е.Д.)	2.31 ± 2.10*	0.45 ± 1.86*	6.23 ± 1.87*
COP (е.Д.)	12.0	9.9	14.5
CP (%)	0.54 ± 0.68*	0.13 ± 0.66*	1.46 ± 0.46*
COP (%)	3.9	3.5	3.6
СКР (е.Д.)	12.2	9.8	15.8
СКР (%)	3.9	3.5	3.9

Примечания. *N* – число сопоставляемых пар данных; *R* – коэффициент корреляции; * – доверительный интервал при 95%-ной достоверности.

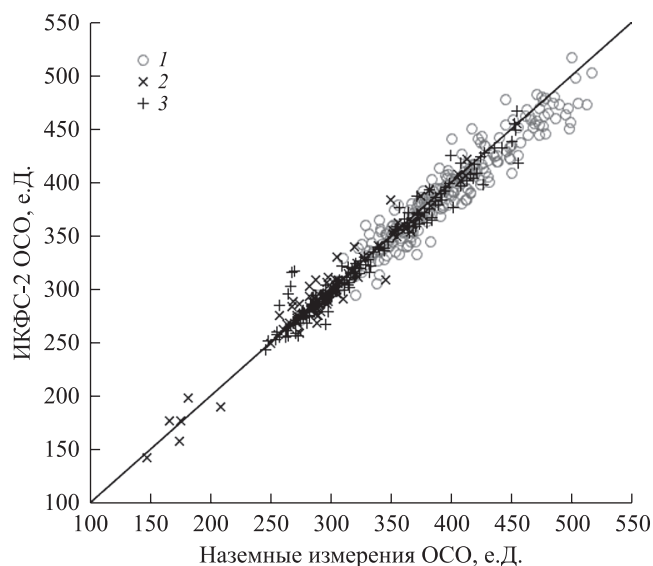


Рис. 2. Сравнение данных ИКФС-2 с данными наземных измерений ОСО: 1 – фотометр М-124, 2 – спектрофотометр Добсона, 3 – спектрофотометр Брюера.

что расстояние между пунктом наземных измерений и центром пикселя при измерении со спутника было менее 100 км. Временной критерий был прежним. Отметим, что значения разностей приведены в абсолютных единицах и в процентах. Значения СР составляют 0.5–6.2 е.Д. (0.1–1.5%), СОР – 9.9–14.5 е.Д. (3.5–3.9%), а полные СКО – 9.8–15.8 е.Д. (3.5–3.9%). При этом наилучшее согласие наблюдается при сравнении с данными измерений на приборе Добсона.

На рис. 2 приведена диаграмма рассеяния результатов наземных измерений ОСО, включающих данные приборов трех типов, относительно данных измерений на ИКФС-2. Из него следует хорошее согласие между результатами наземных и спутниковых измерений, включая условия “озонной дыры” в Антарктиде с очень малыми значениями ОСО.

4. АНАЛИЗ И СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение результатов спутниковых измерений ОСО, полученных с помощью различных методов и приборов, между собой и с результатами наземных и озонзондовых измерений, проводилось на регулярной основе с целью коррекции методов обработки и повышения точности измерений. Взаимное согласование различных методов измерений особенно важно при исследовании долговременных трендов озона и прогнозе времени восстановления озонного слоя [15]. Так, в работе [16] показано, что в течение первых лет измерений с помощью прибора ОМІ не было систематических

отклонений этих данных от данных наземных измерений. Отсутствие заметного временного дрейфа в данных ОМІ было подтверждено в [17]. В целом неоднократные сопоставления позволяют оценить погрешности измерений ОСО с помощью прибора ОМІ в 1–2%.

Спутниковые измерения по методу регистрации теплового излучения обладают меньшей информативностью и, как следствие, меньшей точностью. Одно из первых сравнений результатов, полученных с применением этого метода по излучению из надир (прибор IMG), с результатами, полученными с помощью других спутниковых методов, было проведено в работе [18]. При сопоставлении с данными TOMS CP составила около 4%, а СОР – около 8%. В табл. 4 просуммированы результаты наиболее важных и поздних сопоставлений данных по методу теплового излучения с данными других спутниковых измерений.

Исследования [17] показали, что СР между данными приборов IASI и GOME-2 может достигать 4.9–13. е.Д., а СОР – 9.7–28.2 е.Д. При сравнении данных IASI с данными наземных и озонзондовых измерений СР достигает 44 е.Д., а СОР – 37 е.Д., в среднем часто превышая 10%. При этом коэффициент корреляции находится в диапазоне 0.39–0.98. Слабая корреляция характерна для полярных районов.

В [19] получено хорошее согласие данных спутниковых измерений с помощью прибора IASI с данными наземных измерений. Так, при их сравнении с данными прибора Брюера СР составила не более 1.5%, а СОР – 2.5% (табл. 4). Несколько большие значения СР при значениях СОР того же уровня (2.8%) получены в [20].

Сопоставление данных IASI с данными GOME-2 над Антарктикой в периоды “озонной дыры” показало, что IASI заметно завышает ОСО (СР достигают ~9%) [21]. В тропиках и субтропиках значения ОСО по данным IASI заметно меньше в сравнении с данными ОМІ, и СР составляет – 0.12–4.99%, а СОР не превышает 3.5% [22]. При сравнении данных IASI с данными наземных измерений (приборы Добсон и SAOZ) в этой же работе получены значения СР от –2.65% до 3.12%, а значения СКР – 2.1–3.9%. Подробное исследование погрешностей прибора IASI в течение 7 летнего периода (2008–2014 гг.) в работе [23] показало наличие СР между данными IASI и GOME-2 5.5–7.1% при СОР в пределах 4.2–7.7%. При этом максимальное расхождение для всех сезонов наблюдается в южных полярных широтах, где СР достигает значений – 11.6–15.6%, а СОР составляет 9.0–14.0%. На других широтах эти характеристики составляют 4–6% и 2–5% соответственно. СКР находятся в диапазоне 5–9%. Сопоставление

Таблица 4. Результаты сравнения данных, полученных по надирному методу регистрации теплового излучения (приборы IMG, IASI, TES и ИКФС-2) с данными, полученными по другим методам

NN	Прибор	Независимые измерения	Число пар в сопоставлении	R (или R ²)	СР	СОР	СКР	Литература/примечания
1	IMG	TOMS	1344	0.9	11.83 е.Д. (3.99%)		23.1 е.Д. (7.73%)	[18]
2	IASI	GOME-2 Добсон и Брюер	5863	0.92–0.98 0.85	4.9–13.0 е.Д. 9.3 е.Д. (3.3%)	9.7–28.2 е.Д. 27 е.Д. (9.8%)		[17], глобально
3	IASI	FS 125HR, 1 FS 125HR, 2 Брюер, 1 Брюер 2	13 22 55 77	0.94 0.90 0.89 0.85	–2.0% –5.2% 1.5% –0.9%	1.4% 1.9% 2.2% 2.5%		[19], два алгоритма 1) аналитический 2) оперативный
4	IASI	Брюер	1048	0.93 (R ²)	4.38%	2.81%		[20]
5	IASI	GOME-2		0.967–0.975	–4.9%–8.86% (14.1–25 е.Д.)			[21] /озонная дыра
6	IASI	OMI Добсон или SAOZ		0.57–0.94 (R ²) 0.41–0.93 (R ²)	–0.12–4.99% –2.65–3.12%	2.2–3.5%	1.9–5.0% (5.22–12.2 е.Д.) 2.1–3.9% (5.66–9.93 е.Д.)	[22] / тропики
7	IASI	GOME-2 Брюер и Добсон SAOZ			6.2% 5% 2–4%		7.5%	[23] /Глобальные сравнения
8	TES	OMI MLS	10795 35267	0.96 0.88–0.97 0.93	9.84 е.Д. 3.93–12.12 е.Д. 2.64 е.Д.	14.305 е.Д. 9.45–16.35 е.Д. 13.212 е.Д.		[24] / Глобально Разные широты Выше 100мб
9	IASI	FS125HR M–124 Добсон OMI	212 188 106 261	0.975 0.968 0.976 0.972	–3.6% –2.5% –2.1% 0.1%	3.2% 3.4% 3.0% 3.5%	4.9% 4.3% 3.7% 3.5%	Измерения вблизи Санкт-Петербурга. Версия обработки LISA [25].
10	ИКФС-2	OMI GOME-2 Брюер Добсон M–124	126927 111084 129 111 236	0.99 0.99 0.98 0.98 0.96	0.1% 0.3% 0.5% 0.1% 1.5%	2.8% 3.9% 3.9% 3.5% 3.6%		Настоящая работа 3.9% 3.5% 3.9%

Примечание. R – коэффициент корреляции. Приборы: Добсон, Брюер, FS 125HR, M–124, SAOZ – наземные; TOMS, GOME-2, OMI, MLS – спутниковые.

с данными наземных измерений с помощью приборов Брюера и Добсона показало, что по сравнению с ними IASI завывает в среднем значения ОСО примерно на 5%. При этом отличия в полярных районах могут достигать 9% (Арктика) и 20% (Антарктида).

В восьмой строке табл. 4 приведены статистические характеристики результатов сравнения данных спутникового прибора TES с данными OMI и MLS (выше изобарического уровня 100 мб). Эти данные хорошо согласуются между собой.

В предпоследней строке табл. 4 приведены результаты сопоставления данных IASI версии обработки LISA [25] с результатами различных наземных измерений, выполненных в СПбГУ в районе Санкт-Петербурга, в том числе с данными Фурье-спектрометра Bruker 125HR [26]. Как видно из таблицы, результаты спутниковых (прибор OMI) и наземных измерений отличаются от данных IASI со значениями CP в диапазоне 0.1–3.6% и COP, не превышающими 3.5%.

В последней строке табл. 4 приведены статистические характеристики рассогласования данных измерений ОСО с помощью российского спутникового прибора ИКФС-2 относительно данных OMI и GOME-2, а также относительно данных других наземных измерений (приборы Брюера, Добсона и M-124), полученные в данной работе.

5. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика определения ОСО по результатам измерения спектров уходящего теплового ИК-излучения с помощью прибора ИКФС-2 с борта «МИСЗ “Метеор-М”» № 2 на основе ИНС с использованием результатов измерений ОСО с помощью спутникового прибора OMI.

2. Выполнено восстановление ОСО по данным измерений на приборе ИКФС-2 за период с марта по ноябрь 2015 г. (всего 450 000 спектров) и получена новая информация о вариациях ОСО на глобальном масштабе.

3. Сравнение с результатами независимых спутниковых (приборы OMI и GOME-2) и наземных (приборы Добсона, Брюера, M-124) измерений показало, что данные измерений ОСО с помощью ИКФС-2 согласуются с ними в среднем в пределах 3–6% в зависимости от широтного пояса и сезона. Для глобального ансамбля согласие лучше – в пределах 2–5%. Существенная зависимость разностей между данными различных измерений от широты и сезона указывает на целесообразность анализа погрешностей при обучении ИНС для отдельных широтных зон и сезонов. Такой анализ особенно актуален для полярных широт и областей

формирования “озонных дыр”, в частности, в Антарктиде, где разности между данными ИКФС-2 и результатами независимых измерений достигают 10% и более.

4. Полученные оценки погрешностей ИКФС-2 близки к погрешностям измерений ОСО с помощью близкого по характеристикам прибора IASI на спутнике MetOp (EUMETSAT).

Таким образом, измерения на приборах типа ИКФС-2 и разработанная методика восстановления ОСО могут служить основой для национальной космической системы мониторинга ОСО.

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

Авторы благодарят сотрудников НИЦ “Планета” А. Б. Успенского и А. В. Кухарского за возможность использования спектров ИКФС-2, техническую помощь в их передаче и ценные консультации, а также сотрудника Центра им. Келдыша Д. А. Козлова за работу по повышению качества спектральных измерений на ИКФС-2 и полезные консультации.

В работе использовались данные измерений, полученные с помощью аппаратуры ресурсного центра СПбГУ “Геомодель”.

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. WMO. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010, Global Ozone Research and Monitoring Project – Report No. 52. Geneva: WMO, 2011.
2. Тимофеев Ю.М. Спутниковые методы исследования газового состава атмосферы // Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана. 1989. Т. 25. № 5. С. 451–472.
3. Hassler B., Petropavlovskikh I., Staehelin J. et al. Past changes in the vertical distribution of ozone. Pt 1: Measurement techniques, uncertainties and availability // Atmos. Meas. Tech. 2014. V. 7. P. 1395–1427. URL <http://www.atmos-meas-tech.net/7/1395/2014/doi:10.5194/amt-7-1395-2014>
4. Асмус В.В., Загребав В.А., Макриденко Л.А. и др. Система полярно-орбитальных метеорологических спутников серии “Метеор-М” // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 5–15.
5. Головин Ю.М., Завелевич Ф.С., Никулин А.Г. и др. Бортовые инфракрасные Фурье-спектрометры для температурно-влажностного зондирования

- атмосферы Земли // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 6. С. 25–37
6. Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А. и др. Спутниковый атмосферный зондировщик ИКФС-2. 1. Анализ измерений спектров уходящего излучения // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 5. С. 71–78.
 7. Асмус В.В., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В. и др. Температурное зондирование атмосферы по данным спутникового ИК Фурье-спектрометра ИКФС-2 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. Наст. вып.
 8. Fetzer E., McMillin L.M., Tobin D. et al. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua Mission: Design, Science Objectives, Data Products, and Processing Systems // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. V. 41. № 2. P. 253–264.
 9. August T., Klaes D., Schlüssel P. et al. IASI on Metop-A: Operational Level 2 retrievals after five years in orbit // J. Quant. Spectrosc. 2012. V. 113. P. 1340–1371, doi:10.1016/j.jqsrt.2012.02.028, 2012.
 10. Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б. Возможности определения содержания озона и малых газовых составляющих по данным спутниковых ИК зондировщиков высокого спектрального разрешения (ИКФС-2) // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 3. С. 3–11.
 11. Гаркуша А.С., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М. Анализ возможностей мониторинга характеристик газового состава атмосферы с помощью спутниковой аппаратуры ИКФС-2 // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 5. С. 38–51.
 12. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 280 с.
 13. McPeters R.D., Frith S., Labow G.J. OMI total column ozone: extending the long-term data record // Atmos. Meas. Tech. 2015. Issue 8. P. 4845–4850. URL <http://www.atmos-meas-tech.net/8/4845/2015/> doi:10.5194/amt-8-4845-2015
 14. Koukouli M.E., Balis D.S., Loyola D. et al. Geophysical validation and long-term consistency between GOME-2/MetOp-A total ozone column and measurements from the sensors GOME/ERS-2, SCIAMACHY/ENVISAT and OMI/Aura // Atmos. Meas. Tech. Discuss. 2012. Issue 5. P. 3019–3045. URL <http://www.atmos-meas-tech-discuss.net/5/3019/2012/> doi:10.5194/amtd-5-3019-2012
 15. Labow G., McPeters R., Bhartia P.K. et al. A comparison of 40 years of SBUV measurements of column ozone with data from the Dobson/Brewer network // J. Geophys. Res. 2013. V. 118. Issue. 13. P. 7370–7378, doi:10.1002/jgrd.50503
 16. McPeters R. D., Kroon M., Labow G., et al. Validation of the Aura Ozone Monitoring Instrument total column ozone product // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. Issue. 15, doi:10.1029/2007JD008802.
 17. Boynard A., Clerbaux C., Coheur P.-F. et al. Measurements of total and tropospheric ozone from IASI: comparison with correlative satellite, ground-based and ozonesonde observations // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. Issue 16. P. 6255–6271. URL <http://www.atmos-chem-phys.net/9/6255/2009/> doi:10.5194/acp-9-6255-2009.
 18. Turquety S., Hadji-Lazaro J., Clerbaux C. Operational trace gas retrieval algorithm for the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. Issue D21301, doi:10.1029/2004JD004821.
 19. Viatte C., Schneider M., Redondas A. et al. Comparison of ground-based FTIR and Brewer O₃ total column with data from two different IASI algorithms and from OMI and GOME-2 satellite instruments // Atmos. Meas. Tech. 2011, V. 4. P. 535–546 URL <http://www.atmos-meas-tech.net/4/535/2011/> doi:10.5194/amt-4-535-2011
 20. Antón M., Loyola D., Clerbaux C. et al. Validation of the MetOp-A total ozone data from GOME-2 and IASI using reference ground-based measurements at the Iberian Peninsula // Rem. Sens. Environ. 2011. V. 115. Issue. 6. P. 1380–1386.
 21. Scannell C., Hurtmans D., Boynard A. et al. Antarctic ozone hole as observed by IASI/MetOp for 2008–2010 // Atmos. Meas. Tech. 2012. V. 5. P. 123–139. URL <http://www.atmos-meas-tech.net/5/123/2012/> doi:10.5194/amt-5-123-2012
 22. Tohir M., Bencherif H., Sivakumar V. et al. Comparison of total column ozone obtained by the IASI–MetOp satellite with ground-based and OMI satellite observations in the southern tropics and subtropics // Ann. Geophys. 2015. V. 33. P. 1135–1146. URL <http://www.ann-geophys.net/33/1135/2015/> doi:10.5194/angeo-33-1135-2015.
 23. Boynard A., Hurtmans D., Koukouli M.E. et al. Seven years of IASI ozone retrievals from FORLI: validation with independent total column and vertical profile measurements // Atmos. Meas. Tech. Discuss. 2016, doi:10.5194/amt-2016-11.
 24. Osterman G.B., Kulawik S.S., Worden H.M. et al. Validation of Tropospheric Emission Spectrometer (TES) measurements of the total, stratospheric, and tropospheric column abundance of ozone // J. Geophys. Res. V. 113. № D15S16, doi:10.1029/2007JD008801, 200825.
 25. Dufour G., Eremenko M., Griesfeller A. et al. Validation of three different scientific ozone products retrieved from IASI spectra using ozonesondes // Atmos. Meas. Tech. 2012. № 5. P. 611–630.
 26. Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В. и др. 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.

Determination of the Total Ozone Content from Data of Satellite IR Fourier-Spectrometer

© 2017 A. S. Garkusha, A. V. Polyakov*, Yu. M. Timofeev, Ya. A. Virolainen

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

Examples of retrieving the total ozone content (TOC) from spectra of outgoing thermal radiation measured by IRFS-2 from a board of the meteorological “Meteor-M” No. 2 satellite are given. The technique developed by authors and based on artificial neural network (ANN) approach with use of TOC measurements by means of the satellite OMI device is applied. Comparison of the received results with data of independent TOC measurements has shown their consent within 2–5% for global ensemble and within 3–6% for separate latitudes and seasons. Error estimates for IRFS-2 TOC measurements are close to errors of such measurements by the similar IASI device from the MetOp (EUMETSAT) satellite.

Keywords: ozonosphere, remote sensing, total ozone content, “Meteor-M” № 2, IRFS-2.