

Эмпирические оценки погрешностей измерений общего содержания озона различными методами и приборами

Я.А. Виролайнен¹, Ю.М. Тимофеев¹, А.В. Поберовский¹,
А.В. Поляков¹, А.М. Шаламянский^{2*}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

² Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

Поступила в редакцию 14.07.2016 г.

Знание погрешностей измерительных методов является одним из важнейших условий оценки качества экспериментальных данных. Мы провели сопоставления различных методов и приборов для измерения общего содержания озона (ОСО) в окрестностях Санкт-Петербурга в период 2009–2015 гг. Сравнивались ансамбли измерений ОСО приборами Добсона и М-124 в пос. Воейково, Фурье-спектрометром (ФС) Bruker 125HR в Петергофе, а также спутниковыми приборами OMI и IASI. Для оценки погрешностей каждого из этих приборов были сформированы три ансамбля измерений ОСО, содержащие разное число сопоставлений и основанные на различных критериях отбора. На первом этапе исследования мы определили средние и стандартные отклонения между ансамблями измерений ОСО. Затем, в предположении горизонтально однородного и стационарного поля озона, оценили случайные и систематические погрешности отдельных методов. Средняя по всем трем ансамблям случайная погрешность измерения ОСО прибором IASI составила $(2,9 \pm 0,5)\%$, М-124 – $(2,8 \pm 0,7)\%$, OMI – $(1,2 \pm 0,2)\%$, ФС Bruker – $(1,4 \pm 0,1)\%$. Систематическая погрешность относительно «эталонных» измерений ОСО спектрофотометром Добсона для приборов OMI и IASI равна $-1,7$ и $-2,1\%$ соответственно; для приборов М-124 и ФС Bruker – $+0,5$ и $+2,1\%$ соответственно. Наибольшей стабильностью отличаются измерения ОСО приборами OMI и ФС Bruker; погрешности измерений ОСО приборами IASI и М-124 в значительной степени зависят от состояния атмосферы.

Ключевые слова: атмосферный озон, погрешности, валидация, IASI, OMI, М-124, Bruker, Добсон; atmospheric ozone, errors, validation, IASI, OMI, М-124, Bruker 125HR, Dobson.

Введение

Уникальная роль озона в атмосфере Земли и его влияние на многие атмосферные процессы и окружающую среду стимулировали создание обширной и разнообразной системы мониторинга его содержания [1–3]. Эта система использует различные аппаратуру и методы измерений, как наземные, так и спутниковые. Успешная работа этой системы обусловлена взаимокалибровкой разных методов, а также знанием погрешностей измерений различных приборов. Оценка погрешностей измерений общего содержания озона (ОСО) осуществляется разнообразными методами – с помощью лабораторных исследований, совместных измерений и взаимокалибровок, методическими и численными расчетами. Существенное внимание уделяется валидации различных спутниковых данных с помощью

независимых измерений с известными погрешностями (см., например, [4–9]). Как правило, такие исследования позволяют оценить систематические и случайные рассогласования между различными измерениями ОСО. Значительный интерес представляют также оценки случайных и систематических погрешностей конкретных методов и приборов, их зависимости от времени и места измерений, состояния атмосферы и т.д.

Определенные возможности для получения таких оценок имеются в случае одновременных измерений различными методами и приборами. При наличии двух измерений ОСО их разность определяется как случайными и систематическими погрешностями обоих методов и приборов, так и временными и пространственными вариациями содержания озона. Если мы располагаем тремя и более ансамблями одновременных измерений ОСО разными приборами, осуществленными в одной воздушной массе (горизонтально-однородная, стационарная атмосфера), то можно ставить и решать задачу определения точностных характеристик каждого из приборов, например случайных и систематических погрешностей этих измерений.

* Яна Акселевна Виролайнен (yana.virolainen@spbu.ru); Юрий Михайлович Тимофеев (y.timofeev@spbu.ru); Анатолий Васильевич Поберовский (avpob@troll.phys.spbu.ru); Александр Викторович Поляков (a.v.polyakov@spbu.ru); Аркадий Матвеевич Шаламянский (ozon@peterlink.ru).

Такой подход представляет собой решение специфической обратной задачи – определение погрешностей измерений по статистическим характеристикам рассогласований данных разных приборов. Этот подход был продемонстрирован в ряде работ (см., например, [10, 11]) по определению погрешностей влагосодержания атмосферы. Для ОСО подобные оценки ранее не проводились.

В данной работе впервые решается обратная задача по оценке случайных и систематических погрешностей определения ОСО ряда наземных и спутниковых приборов по наблюдениям в Петергофе (59,88° с.ш., 29,82° в.д.) и пос. Воейково (59,95° с.ш., 30,70° в.д.).

1. Приборы и методы измерений ОСО

На кафедре физики атмосферы физического факультета СПбГУ проводятся сопоставления различных методов и аппаратуры измерений ОСО, в том числе валидация спутниковых данных [5–7]. Охарактеризуем кратко используемые методы и приборы.

Наземные ИК-измерения Фурье-спектрометром Bruker 125HR. Измерения спектров прямого солнечного ИК-излучения с высоким спектральным разрешением осуществляются с помощью Фурье-спектрометра IFS Bruker 125HR (ФС Bruker) и подробно описываются в работах [6, 7]. При этом используются спектральные окна, рекомендованные международной сетью наблюдений NDACC, и программа интерпретации PROFFIT [12]. Измерения в стабильных атмосферных условиях дают погрешность единичного измерения ОСО порядка 2–3%, в которую значительный вклад вносит систематическая погрешность измерений, обусловленная погрешностями задания спектроскопической информации.

Измерения спектрофотометром Добсона. Спектрофотометр Добсона № 108 (ГГО им. Воейкова) служит эталонным прибором озонметрической сети Росгидромета и регулярно (один раз в 3–4 года) проверяется в международных сравнениях с эталонным прибором ВМО. Наблюдения в основном выполняются по прямому Солнцу, погрешность единичного измерения ОСО при этом не превышает 2% [13]. Измерения и их обработка осуществляются сотрудниками ГГО им. Воейкова по стандартизированной методике.

Измерения прибором М-124. Фильтровый озонметр М-124 долгое время был основным прибором российской озонметрической сети. Эти приборы проходят регулярную калибровку в параллельных измерениях со спектрофотометром Добсона № 108. Многолетние измерения с помощью озонметра М-124 показали, что погрешность единичного измерения ОСО не превышает 5–8%, а погрешность определения среднего за день значения ОСО составляет 3–4% [14]. Наблюдения ОСО с помощью озонметра М-124 № 403, который является рабочим прибором на озонметрической станции Воейково, проводятся ежедневно (8 сеансов в день). В ясные дни проводятся параллельные наблюдения на спектрофотометре Добсона; максимальные расхождения с этим прибором, как правило, не превышают 10 е.д.

Спутниковые измерения прибором ОМІ. Спутниковый прибор ОМІ (Ozone Monitoring Experiment) [15] является пространственно-сканирующим спектрометром для надирных измерений уходящего (отраженного и рассеянного) излучения в УФ- и видимой областях спектра. Прибор ОМІ работает на борту американского спутника AURA, запущенного в 2004 г. на околополярную солнечно-синхронную орбиту. Схема сканирования прибора ОМІ позволяет выполнять ежедневное глобальное картирование поля ОСО с пространственным разрешением в надире $\sim 13 \times 24$ км². Заявленная погрешность измерений ОСО с использованием версии обработки TOMS составляет менее 3% [16].

Спутниковые измерения прибором IASI. Прибор IASI измеряет спектры уходящего теплового излучения атмосферы в широкой спектральной области – от 645 до 2760 см⁻¹ – с высоким спектральным разрешением. Эти измерения используются для определения вертикальных профилей температуры, влажности, содержания озона и других параметров атмосферы и поверхности [17]. Пространственное разрешение составляет около 12 км в диаметре. Измерения осуществляются два раза в сутки – в 9:30 и 21:30 местного астрономического времени (м.а.в.). При интерпретации данных прибора IASI с целью определения содержания озона используются различные методики и алгоритмы [18]. В нашей работе использован алгоритм LISA, который в среднем дает погрешность определения ОСО, не превышающую 3% [18]. Ранее этот алгоритм был апробирован на станции Петергоф при сопоставлении полученного с его помощью содержания тропосферного озона с данными ФС Bruker [19].

2. Массивы согласованных измерений ОСО

Для сопоставления различных измерений мы отобрали дни, в которые ОСО измерялось всеми указанными приборами. Таких дней за период с 2009 по 2015 г. оказалось 125. Число измерений относительно мало из-за того, что спектрофотометр Добсона № 108 периодически участвует в интеркалибровках с другими приборами.

Перечислим особенности сформированных ансамблей измерений ОСО:

– данные ФС Bruker (измерения в Петергофе) осреднены за период с 7:00 до 13:00 м.а.в. или за меньший период, в зависимости от погоды;

– данные спутникового прибора IASI осреднены в радиусе 1° от Петергофа по измерениям в утренние часы (9:30 м.а.в.);

– данные спутникового прибора ОМІ получены с использованием версии обработки TOMS – осредненные значения, попадающие в область радиусом 200 км от Воейково (измерения примерно в 12:00–13:00 м.а.в.);

– данные наземных приборов Добсона и М-124 в Воейково (измерения по Солнцу) осреднены за день (измерения осуществляются преимущественно в первую половину дня).

Для оценок погрешностей отдельных приборов были сформированы три разных ансамбля. Ансамбль 1 состоит из 125 дней измерений ОСО всеми пятью приборами, ансамбль 2 – из 278 дней измерений (сравнения четырех приборов без Добсона) и ансамбль 3 – измерений четырьмя приборами (без Добсона) для дней высокой временной стабильности ОСО (125 дней).

В табл. 1 приведены средние значения ОСО и их изменчивость (среднеквадратические отклонения от среднего (СКО)) по данным измерений различными приборами для всех трех ансамблей. Поскольку наземные измерения осуществлялись по прямому Солнцу, большинство измерений в выборках относятся к весенне-летнему периоду. Ансамбль 1 состоит из 55 дней измерений весной, 59 – летом и 11 – осенью; ансамбль 2 – из 91 дня измерений весной, 115 – летом, 45 – осенью и 27 – зимой. В ансамбле 3 из всех 278 дней измерений были отобраны наиболее стабильные дни, когда изменения ОСО по данным ФС Bruker не превышали 1% в течение нескольких часов. Таких дней оказалось 125, из них весной – 43, летом – 50, осенью 22 и зимой – 10.

Таблица 1
Статистические характеристики ансамблей измерения ОСО для различных приборов

Прибор	Среднее и СКО, е.Д.		
	1	2	3
IASI	336 ± 44	334 ± 47	329 ± 46
OMI	338 ± 44	334 ± 47	330 ± 45
M-124	345 ± 45	339 ± 48	336 ± 46
ФС Bruker	351 ± 46	348 ± 50	343 ± 48
Добсона	344 ± 44	–	–

Из табл. 1 видно, что, во-первых, средние и СКО всех ансамблей и приборов очень близки (отличия для средних составляют 2–4%), во-вторых, наземные измерения дают несколько большие средние значения ОСО, чем спутниковые, при этом среднее по ансамблю значение максимально для ФС Bruker. В то же время изменчивость ОСО примерно одинакова по данным измерений всех приборов для всех ансамблей.

3. Сравнения различных измерений ОСО

В табл. 2 приведены средние рассогласования M^{A-B} и стандартные отклонения от средних σ^{A-B} попарно для всех приборов отдельно для каждого ансамбля. Отметим, что коэффициент корреляции для разных ансамблей составляет 0,97–0,99 (с погрешностью 0,01–0,02).

Данные табл. 2 позволяют сделать следующие выводы.

– Минимальные средние отличия в измерениях ОСО наблюдаются при сравнениях приборов Добсона и M-124 (–0,5%) и между спутниковыми измерениями OMI и IASI (0,0 – +0,4). Это можно объяснить в первом случае периодической калибровкой M-124 по данным измерений спектрофотометром Добсона, а во втором случае предположить, что при отработке методик и алгоритмов интерпретации измерений IASI проводилась валидация данных IASI с помощью измерений OMI.

– Если рассматривать измерения ОСО прибором Добсона как эталон, то спутниковые приборы занижают ОСО примерно на 2%. Аналогичные результаты были получены в ряде других работ (см., например, [9, 20]). В то же время наземные измерения ФС Bruker, наоборот, завышают ОСО также примерно на 2%. Подобный эффект был обнаружен ранее в работе [21] при сопоставлениях УФ- и ИК-измерений ОСО. Он объясняется несогласованностью количественных характеристик молекулярного поглощения в разных областях спектра. Как следствие, наземные измерения (M-124 и ФС Bruker) дают большие на 2–4% значения ОСО по сравнению со спутниковыми измерениями (приборы OMI и IASI).

– Изменчивость характеристик рассогласований между различными приборами для разных ансамблей сравнений невелика и составляет, как правило, около 1%. Максимальные рассогласования наблюдаются для ансамбля 2 – наиболее представительного ансамбля сравнений, охватывающего все сезоны года. Особенно это проявляется для стандартных отклонений ОСО при разных сопоставлениях.

Таблица 2
Средние рассогласования и стандартные отклонения от средних при сопоставлении трех ансамблей ОСО, полученных по измерениям различными приборами

Прибор	Ансамбль	IASI, %	OMI, %	ФС Bruker, %	M-124, %
OMI	1	+0,4 ± 2,5			
	2	0,0 ± 3,4			
	3	0,3 ± 2,7			
ФС Bruker	1	+4,3 ± 2,6	+3,8 ± 2,0		
	2	+4,0 ± 3,6	+4,1 ± 2,4		
	3	+4,2 ± 2,8	+4,0 ± 2,2		
M-124	1	+2,6 ± 3,1	+2,2 ± 2,5	–1,6 ± 2,4	
	2	+1,6 ± 5,2	+1,6 ± 3,4	–2,4 ± 3,6	
	3	+2,0 ± 4,2	+1,7 ± 3,1	–2,2 ± 2,9	
Добсона	1	+2,1 ± 2,9	+1,7 ± 1,9	–2,1 ± 2,3	–0,5 ± 2,1

– В среднем наилучшее согласие наблюдается при сравнениях приборов Добсона и ОМІ (если не принимать во внимание сопоставления ансамблей Добсона и М-124), измеряющих в УФ-области спектра.

Как правило, валидация различных спутниковых измерений на этом заканчивается, но, имея одновременные измерения ОСО различными приборами, можно оценить погрешности измерений отдельных приборов.

4. Эмпирические оценки погрешностей измерений ОСО различными приборами

Представим индивидуальное измерение x_i^A прибором А в виде

$$x_i^A = x_{i,ист}^A + M^A + \sigma_i^A,$$

где $x_{i,ист}^A$ – истинное значение измеренной величины; M^A и σ_i^A – систематическая и случайная погрешности измерения соответственно. Тогда средняя по ансамблю разность M^{A-B} между двумя типами измерений (приборами А и В) при достаточно больших выборках (когда средние случайные погрешности равны нулю) определяется разностью систематических погрешностей отдельных измерений:

$$M^{A-B} = M^A - M^B. \quad (1)$$

Данная модель сравнений справедлива для горизонтально-однородной и стационарной атмосферы.

Стандартное отклонение от средней разности σ^{A-B} при наличии временного $\sigma^{вп}$ и пространственного $\sigma^{пр}$ рассогласований измерений, а также при условии некоррелированности отдельных случайных ошибок и в предположении равенства нулю средних случайных погрешностей может быть записано в общем случае как

$$\sigma^{A-B^2} = \overline{\sigma^{A^2}} + \overline{\sigma^{B^2}} + \overline{\sigma^{вп^2}} + \overline{\sigma^{пр^2}}. \quad (2)$$

Поскольку в данных присутствуют спутниковые измерения, которые осредняются в некотором радиусе от наземных измерительных станций, можно

предположить, что при достаточно большом объеме выборки средние значения пространственного рассогласования между наземными и спутниковыми измерениями стремятся к нулю. Расстояние между Петергофом и пос. Воейково составляет около 50 км, в обоих пунктах, как правило, наблюдается одна и та же воздушная масса относительно содержания озона. Что касается временного рассогласования, то наземные измерения осредняются за период в несколько часов в обе стороны от времени спутникового измерения. ОСО, как правило, мало меняется в течение дня, за исключением периодов активного движения воздушных масс, поэтому с учетом осреднения наземных измерений можно предположить, что и средние значения временного рассогласования стремятся к нулю. Отметим, что ансамбль 3 был сформирован специально для исследований возможного влияния нестационарности поля ОСО.

Считая в уравнении (2) неизвестные, относящиеся к временному и пространственному рассогласованию измерений, равными нулю, мы получим оценки погрешностей сверху для каждого из приборов. Расписывая для каждой пары приборов уравнения (2), получим систему из 10 линейных уравнений, в которых свободный член представляет собой квадрат стандартного отклонения σ^{A-B^2} из табл. 2. Псевдорешением переопределенной системы линейных уравнений $Ax = B$, т.е. максимально правдоподобным решением этой обратной задачи, является столбец x , обеспечивающий минимум суммы квадратов разностей левых и правых частей уравнений. Решением задачи минимизации является псевдообратная матрица к матрице А, т.е.

$$x = (A^T A)^{-1} A^T B. \quad (3)$$

В результате решения задачи (3) мы получили экспериментальные оценки случайной погрешности отдельных приборов, представленные для разных ансамблей в табл. 3. Для ансамбля 1 случайные погрешности измерений ОСО минимальны при измерениях приборами ОМІ (1,3%), Добсона (1,5%) и ФС Bruker (1,5%). Для озонметра М-124 эта погрешность составляет 1,9%, прибора IASI – 2,4%. Существенное расширение ансамбля сравнений (ансамбль 2) заметно увеличивает случайные погрешности для IASI и М-124 (до 3,5%).

Таблица 3

Оценки погрешностей (%) измерения ОСО различными приборами. Систематическая и полная погрешность рассчитываются относительно нулевой систематической погрешности Добсона

Прибор	$\sigma_{случ}$			$\sigma_{сист}$	$\sigma_{полн}$			$\sigma_{полн.незав}$
	1	2	3	1	1	2	3	
IASI	2,4	3,5	2,7	-2,1	3,2	4,1	3,4	2,7 [18]
OMI	1,3	0,9	1,3	-1,7	2,1	1,9	2,1	3 [16]
М-124	1,9	3,5	2,9	+0,5	2,0	3,5	2,9	3 [14]
ФС Bruker	1,5	1,5	1,2	+2,1	2,6	2,6	2,4	2-4 [6]
Добсон	1,5	$\sigma_{вп} = 0,6-0,8$		0,0	1,5	$\sigma_{пр} = 0,9$		2 [13]

Надо отметить, что погрешности наземных и спутниковых измерений рядом приборов имеют заметный сезонный ход (см., например, [6]), и увеличение случайных погрешностей в табл. 3 для ансамбля 2 связано, вероятно, с включением осенних и зимних измерений. При этом для спутникового прибора ОМІ случайная компонента погрешностей уменьшилась и составила 0,9%, что, возможно, связано с подавлением случайных ошибок измерений за счет большего числа сопоставлений, а также подавлением вклада случайных пространственных и временных рассогласований. Наконец, для ансамбля 3 (минимальные временные вариации поля озона) для приборов М-124 и IASI случайные погрешности заметно уменьшились по сравнению с ансамблем 2, что косвенно указывает на возможные расхождения, обусловленные временными вариациями озона, которые, по нашим оценкам, составляют 0,6–0,8% (врезка внизу 2-го столбца табл. 3).

Средняя по всем трем ансамблям случайная погрешностей измерения ОСО прибором IASI составляет $(2,9 \pm 0,5)\%$, М-124 – $(2,8 \pm 0,7)\%$, ОМІ – $(1,2 \pm 0,2)\%$, ФС Bruker – $(1,4 \pm 0,1)\%$. Величина изменчивости погрешности характеризует ее зависимость от условий измерений. Как видно, наибольшей стабильностью отличаются измерения ОСО приборами ОМІ и ФС Bruker, точность М-124 и IASI сильнее зависит от состояния атмосферы. В целом, полученные значения свидетельствуют об устойчивости решения поставленной обратной задачи определения погрешностей измерений ОСО отдельными приборами.

Поскольку данные прибора ОМІ приведены (центрированы) к станции Воейково, а данные IASI – к станции Петергоф, мы можем использовать уравнения (2) для оценки пространственной погрешности в предположении, что она отлична от нуля между приборами, относящимися к различным наземным станциям. При этом полученные случайные погрешности для отдельных приборов практически не изменились, а пространственная компонента погрешности измерений ОСО между Воейково и Петергофом была оценена в 0,9% (врезка внизу 4-го столбца табл. 3).

Если принять измерения ОСО спектрофотометром Добсона как эталонные и считать их систематические погрешности нулевыми, то в 5-м столбце приведены оценки систематических погрешностей измерений четырьмя приборами относительно шкалы измерений Добсона (см. уравнение (1)). Для ансамбля 1 систематические погрешности максимальны для приборов IASI и ФС Bruker, составляя по абсолютной величине 2,1%, причем, как уже отмечалось ранее, измерения прибором IASI занижают значения ОСО, а измерения ФС Bruker завышают ОСО по отношению к данным прибора Добсона. Довольно существенны систематические погрешности и у спутникового прибора ОМІ, минимальны же они при наземных измерениях М-124. Последнее объясняется регулярной калибровкой М-124 с помощью спектрофотометра Добсона.

В 6–8-м столбцах табл. 3 приведены оценки полных погрешностей измерений различных приборов для разных ансамблей сопоставлений. Они минимальны и близки к 2% для прибора ОМІ. Полные погрешности для ФС Bruker составляют 2,4–2,6%, для прибора IASI – 3,2–4,1% в зависимости от использованного ансамбля сравнений. В последнем столбце табл. 3 приведены оценки полных погрешностей измерений ОСО различными приборами по данным указанных в таблице работ, которые, в целом, хорошо согласуются с оценками, полученными в наших исследованиях. Исключение составляют оценки работы [18] для прибора IASI, которые на 0,5–1,4% меньше наших оценок. Это, возможно, связано с отличиями в использованных ансамблях сравнений в двух работах (как было показано выше, погрешности измерения прибором IASI чувствительны к условиям состояния атмосферы). В то же время большие погрешности для прибора IASI по сравнению с другими приборами можно объяснить тем, что они получены с помощью интерпретации измерений уходящего теплового излучения атмосферы. В этом дистанционном методе присутствует значительно больше факторов, влияющих на погрешности метода, чем в других использованных методах, в частности, величины температурных градиентов в атмосфере и точности их определения [22].

5. Основные результаты и выводы

Проведены сопоставления различных приборов и методов измерений ОСО в районе Санкт-Петербурга в 2009–2015 гг. Сравнились измерения приборами Добсона и М-124 в пос. Воейково, ФС Bruker в Петергофе и спутниковые измерения с помощью приборов ОМІ и IASI. Для оценок погрешностей каждого из этих приборов были сформированы три ансамбля, согласованных по времени измерений ОСО. Ансамбли содержат разное число сопоставлений (дней измерений), разные критерии отбора и включают измерения пяти или четырех приборов (без спектрофотометра Добсона, рассматриваемого как эталон).

Средние и СКО значений ОСО для всех ансамблей и приборов очень близки (отличия в средних составляют 2–4%). Минимальные средние отличия в измерениях ОСО наблюдаются при сравнениях данных приборов Добсона и М-124 (–0,5%), а также между спутниковыми измерениями ОМІ и IASI (0,0 – +0,4%). В первом случае это можно объяснить периодической калибровкой М-124 по данным измерений Добсона, во втором – предположить, что при обработке методик и алгоритмов интерпретации измерений IASI проводилась валидация данных IASI с помощью измерений ОМІ.

Максимальные стандартные отклонения от средних рассогласований наблюдаются для наиболее представительного ансамбля сравнений, охватывающего все сезоны года. В среднем наилучшее согласие наблюдается при сравнении данных приборов Добсона и ОМІ (если не принимать во внимание сопоставления ансамблей измерений приборами

Добсона и M-124). Коэффициент корреляции между данными различных приборов равен 0,95–0,98 (с погрешностью 0,01–0,02).

На втором этапе исследований решалась обратная задача по определению погрешностей измерений отдельных приборов на основе рассчитанных ранее статистических характеристик рассогласований между ними. В предположении горизонтально однородного и стационарного поля озона получены следующие результаты.

Средняя по всем трем ансамблям случайная погрешность измерения ОСО прибором IASI составляет $(2,9 \pm 0,5)\%$, M-124 – $(2,8 \pm 0,7)\%$, OMI – $(1,2 \pm 0,2)\%$, ФС Bruker – $(1,4 \pm 0,1)\%$. Наибольшей стабильностью отличаются измерения ОСО приборами OMI и ФС Bruker, точность двух других приборов сильнее зависит от состояния атмосферы, ухудшаясь при существенном расширении ансамбля сравнений (ансамбль 2). При заведомо стационарном поле озона (ансамбль 3) для приборов M-124 и IASI случайные погрешности заметно меньше, что косвенно указывает на возможные расхождения, обусловленные временными вариациями озона ($\sim 0,6$ – $0,8\%$).

В предположении, что данные прибора OMI центрированы к станции Воейково, а данные IASI – к станции Петергоф, пространственная компонента погрешности измерений ОСО между Воейково и Петергофом может быть оценена в 0,9%.

Определены систематические погрешности четырех приборов относительно спектрофотометра Добсона: они максимальны для приборов IASI и ФС Bruker (2,1%). Для прибора OMI погрешность составляет 1,7%. Спутниковые приборы занижают, а ФС Bruker завышает величины ОСО по отношению к прибору Добсона. Минимальны погрешности для прибора M-124, что объясняется регулярной калибровкой этого прибора с помощью спектрофотометра Добсона.

Определены полные погрешности измерений ОСО различными приборами для разных ансамблей сравнений. Они минимальны для прибора OMI ($\sim 2\%$). Измерения ФС Bruker имеют полные погрешности 2,4–2,6%, IASI – 3,2–4,1%, в зависимости от использованного ансамбля сопоставлений. Сравнения полученных оценок с ранее опубликованными данными показывают их хорошее согласие, за исключением оценок для спутникового прибора IASI, которые на 0,5–1,4% превышают оценки работы [18]. Последнее, возможно, связано с отличием условий Петергофа и Воейково от условий сопоставлений в [18].

Наземные измерения в Петергофе осуществлены с помощью аппаратуры Ресурсного Центра СПбГУ «Геомодель» (ФС Bruker).

Проведенные исследования профинансированы из средств гранта РФФИ № 14-17-00096.

1. Assessment for Decision-Makers: Scientific Assessment of Ozone Depletion. Global Ozone Research and Monitoring Project. Report N 56. Geneva: WMO, 2014. 88 pp.

2. Тимофеев Ю.М. Спутниковые методы исследования газового состава атмосферы (обзор) // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1989. Т. 26, № 5. С. 451–472.
3. Hassler B., Petropavlovskikh I., Staehelin J., August T., Bhartia P.K., Clerbaux C., Degenstein D., Maziure M.D., 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., Kyrola 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 – Part 1: Measurement techniques, uncertainties and availability // Atmos. Meas. Tech. 2014. V. 7, N 5. P. 1395–1427.
4. Balis D., Kroon M., Koukouli M.E., Brinksma E.J., Labow G., Veefkind J.P., McPeters R.D. Validation of Ozone Monitoring Instrument total ozone column measurements using Brewer and Dobson spectrophotometer ground-based observations // J. Geophys. Res. 2007. V. 112, N D24S46. DOI:10.1029/2007JD008796.
5. Timofeyev Y., Virolainen Y., Makarova M., Poberovskiy A., Polyakov A., Ionov D., Osipov S., Imhasin H. Ground-based spectroscopic measurements of atmospheric gas composition near Saint Petersburg (Russia) // J. Mol. Spectr. 2016. V. 323. May 2016. P. 2–14.
6. Virolainen Ya.A., Timofeev Yu.M., Poberovskii A.V. Intercomparison of satellite and ground-based ozone total column measurements // Izv., Atmos. Ocean. Phys. 2013. V. 49, N 9. P. 993–1001.
7. Virolainen Ya.A., Timofeyev Yu.M., Polyakov A.V., Ionov D.V., Poberovskiy A.V. Intercomparison of satellite and ground-based measurements of ozone, NO₂, HF, and HCl near Saint Petersburg, Russia // Int. J. Remote Sens. V. 35, N 15. P. 5677–5697.
8. McPeters R.D., Kroon M., Labow G., Brinksma E.J., Balis D., Petropavlovskikh I., Veefkind J.P., Bhartia P.K., Levelt P.F. Validation of the Aura Ozone Monitoring Instrument Total Column Ozone Product // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. N D15S14. DOI: 10.1029/2007JD008802.
9. Ialongo I., Casale G.R., Siani A.M. Comparison of total ozone and erythemal UV data from OMI with ground-based measurements at Rome station // Atmos. Chem. Phys. 2008. V. 8, N 12. P. 3283–3289.
10. Ning T., Wang J., Elgered G., Dick G., Wickert J., Bradke M., Sommer M., Querel R., Smale D. The uncertainty of the atmospheric integrated water vapour estimated from GNSS observations // Atmos. Meas. Tech. 2016. V. 9, N 1. P. 79–92.
11. Ионов Д.В., Калинин В.В., Тимофеев Ю.М., Зайцев Н.А., Виrolainen Я.А., Косцов В.С., Пoberovskiy А.В. Сравнения радиофизических и оптического ИК наземных методов измерений интегрального содержания водяного пара // Изв. вузов. Радиофиз. 2016 (В печати).
12. Hase F., Hannigan J.W., Coffey M.T., Goldman A., Hupfner M., Jones N.B., Rinsland C.P., Wood S.W. Intercomparison of retrieval codes used for the analysis of high-resolution ground-based FTIR measurements // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2004. V. 87, N 1. P. 25–52.
13. Komhyr W.D., Evans R.D. Operations handbook – ozone observations with a Dobson spectrophotometer. Geneva: WMO, 1980 (revised 2008). <http://www.wmo.int/>

- wmo.int/pages/prog/arep/gaw/documents/GAW183-Dobson-WEB.pdf).
14. Шаламянский А.М. Озонометрическая сеть СНГ // Метеорол. и гидрол. 1993. № 9. С. 100–104
 15. Levelt P.F., Van Den Oord G.H.J., Dobber M.R., Malkki A., Visser H., De Vries J., Stammes P., Lundell J.O.V., Saari H. The Ozone Monitoring Instrument // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2006. V. 44. P. 1093–1101.
 16. Bhartia P.K., Wellemeyer C.W. OMI TOMS-V8 Total O₃ Algorithm, Algorithm Theoretical Baseline Document: OMI Ozone Products. V. 2. ATBD-OMI-02, version 2.0. 2002. URL: http://eosps.gsfc.nasa.gov/eos_homepage/for_scientists/atbd/docs/OMI/ATBD-OMI-02.pdf
 17. Clerbaux C., Boynard A., Clarisse L., George M., Hadji-Lazaro J., Herbin H., Hurtmans D., Pommier M., Razavi A., Turquety S., Wespes C., Coheur P.-F. Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9, N 16. P. 6041–6054.
 18. Dufour G., Eremanko M., Griesfeller A., Barret B., LeFlochmoln E., Clerbaux C., Hadji-Lazaro J., Coheur P.-F., Hurtmans D. Validation of three different scientific ozone products retrieved from IASI spectra using ozonesondes // Atmos. Meas. Tech. 2012. V. 5, N 3. P. 611–630.
 19. 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. Физ. атмосфер. и океана. 2015. Т. 51, № 2. С. 191–200.
 20. Anton M., Lopez M., Vilaplana J.M., Kroon M., McPeters R., Bacyn M., Serrano A. Validation of OMI-TOMS and OMI-DOAS total ozone column using five Brewer spectroradiometers at the Iberian peninsula // J. Geophys. Res. 2009. V. 114, N D14307. DOI: 10.1029/2009JD012003.
 21. Viatte C., Schneider M., Redondas A., Hase F., Eremanko M., Chelin P., Flaud J.-M., Blumenstock T., Orphal J. 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, N 3. P. 535–546.
 22. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеониздат, 1978. 280 с.

Ya.A. Virolainen, Yu.M. Timofeyev, A.V. Poberovskii, A.V. Polyakov, A.M. Shalamyanskii. The empirical assessment of the errors of different instrumentation for total ozone measurements.

The knowledge of the errors of measurement methods is very important for the assessment of the quality of experimental data. We compare the results of various measurements of total ozone content (TOC) near St. Petersburg between 2009 and 2015. We consider the TOC datasets of ground-based measurements in Voeykovo (Dobson spectrophotometer and M-124 ozonometer) and in Peterhof (Bruker 125HR spectrometer) as well as OMI and IASI satellite measurements. With the aim to assess the errors of the each individual method, we formed three datasets of coincident TOC measurements, depending on the number of comparisons and different criteria for selection. First, we calculated the means and the standard deviation from the means for the TOC differences in pairs of coincident datasets. Second, under the assumption of a horizontally homogeneous and stationary ozone field during each day of measurements, we assessed the random and systematic errors of the individual methods. The mean random error of the TOC measurements totals $2.9 \pm 0.5\%$, $2.8 \pm 0.7\%$, $1.2 \pm 0.2\%$, and $1.4 \pm 0.1\%$ for IASI, M-124, OMI, and Bruker 125HR, respectively. The systematic error relative to the standard Dobson measurements amounts to -1.7% and -2.1% for OMI and IASI, respectively, and is equal to $+0.5\%$ and $+2.1\%$ for M-124 and Bruker 125HR, respectively. OMI and Bruker 125HR TOC measurement errors are resistant to atmospheric condition, whereas errors of IASI and M-124 TOC measurements are highly dependent on the state of atmosphere.