

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

СРАВНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА

© 2013 г. Я. А. Виролайн*, Ю. М. Тимофеев, А. В. Поберовский

Физический факультет Санкт-Петербургского государственного университета

*E-mail: Yana.Virolainen@JV14952.spb.edu

Поступила в редакцию 10.09.2012 г.

В работе проанализированы измерения общего содержания озона (ОСО), выполненные в 2009–2012 гг. в окрестностях Санкт-Петербурга с помощью ИК-Фурье-спектрометра (ИКФС) (Петергоф, СПбГУ), фильтрового озонометра М-124 и спектрофотометра Добсона (станция ГГО в п. Воейково), а также спектрометром ОМІ (на борту спутника AURA). Проведено сопоставление ансамблей наземных измерений между собой, а также их сопоставление со спутниковыми данными. Показано, что среднеквадратичное (СК) отклонение от среднего рассогласования для всех приборов составляет 2.5–4.5%, при этом приборы ИКФС и Добсон, измеряющие по прямому Солнцу, лучше согласуются с ОМІ, чем М-124, измеряющий также и рассеянное в зенит солнечное излучение. При сопоставлении измерений ОСО прибором М-124 и прибором ОМІ (850 дней измерений) обнаружен сезонный ход рассогласований между двумя сериями измерений с амплитудой 1.5%. Осенью и зимой наземный прибор занижает данные по ОСО по сравнению со спутниковым прибором; весной и летом, наоборот, завышает. Также обнаружено, что прибор ИКФС систематически завышает данные по ОСО по сравнению с результатами измерений другими приборами от 1.4% (Добсон) до 3.4% (ОМІ). Учитывая пространственно-временное рассогласование независимых ансамблей измерений, анализ СК-расхождений между наземными и спутниковыми данными, прибор ИКФС (СПБГУ), может быть рекомендован для валидации спутниковых измерений ОСО.

Ключевые слова: общее содержание озона, дистанционные методы исследования атмосферы, Фурье-спектрометрия, валидация спутниковых измерений

DOI: 10.7868/S0205961413030056

ВВЕДЕНИЕ

Исследования изменений содержания радиационно-активных и озоноразрушающих атмосферных газов в земной атмосфере и их влияние на погоду и климат планеты являются одной из центральных проблем современной физики и химии атмосферы. Поэтому постоянный мониторинг их содержания очень важен для понимания процессов формирования климата Земли и прогнозов его изменений. Важную роль в формировании климата Земли играет атмосферный озон. Он определяет термическую структуру стратосферы, УФ-освещенность поверхности, является парниковым и токсичным газом в тропосфере.

В период 1997–2001 гг. общее глобальное содержание озона было на 3% меньше его общего содержания до 80-х годов прошлого столетия (WMO, 2003). Снижение общего содержания озона (ОСО) зависит от широты – нет его заметного снижения в тропиках, но наблюдается его снижение на широтах 30°–60° на 3–6% в зависимости от полушария. Снижение ОСО обусловлено, по современным представлениям, увеличением со-

держания соединений хлора и брома (за счет антропогенного влияния), рост которых был зафиксирован локальными и дистанционными (наземными и спутниковыми) измерениями. Проблема предотвращения разрушения озонового слоя стимулировала создание и совершенствование комплексной глобальной системы мониторинга ОСО, являющегося наиболее доступной для измерений и информативной характеристикой состояния озонового слоя (Перов, Хргиан, 1989).

Эта система в настоящее время включает подсистемы наземных и спутниковых измерений ОСО. Наземная сеть измерений использует, в основном, приборы Добсона, Брюера и М-124. Спутниковые измерения ОСО осуществляются различными методами – с помощью интерпретации измерений отраженного и рассеянного солнечного излучения и уходящего теплового излучения в различных областях спектра (Тимофеев, 2010).

Важной проблемой является взаимокалибровка различных систем измерений или валидация спутниковых измерений ОСО на основе сопо-

ставления со стандартизованными наземными измерениями.

НАЗЕМНЫЕ И СПУТНИКОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ОСО

С начала исследований озонового слоя атмосферы было предложено много различных вариантов наземной аппаратуры для измерений ОСО. Измерения ОСО с помощью спектрофотометров Добсона (Dobson, 1957) еще в 30-х годах прошлого столетия положили начало регулярным наблюдениям за ОСО. И в настоящее время эти приборы являются наиболее точными инструментами для измерений ОСО. В 1960-х годах были начаты наблюдения с помощью фильтровых озонометров М-83, а позже их сменили озонометры М-124 (Гущин, Соколенко, 1987). С середины 1970-х годов появились автоматизированные спектрофотометры Брюера (Brewer, 1973). Всемирная метеорологическая организация (ВМО) объединила большинство станций наблюдений ОСО в мировую озонную сеть, а приборы трех указанных выше типов стали ее инструментальной основой.

В настоящей работе анализируются наземные измерения ОСО с помощью двух приборов Главной геофизической обсерватории (ГГО) в п. Воейково (59.95° с.ш., 30.70° в.д.) — спектрофотометра Добсона и фильтрового озонометра М-124, а также измерения спектров прямого солнечного излучения Фурье-спектрометром Bruker 125HR (ИКФС) Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ), которые проводятся в Петергофе (59.88° с.ш., 29.82° в.д.).

Спектрофотометр Добсона № 108 (ГГО) служит эталонным прибором озонометрической сети Росгидромета и регулярно (один раз в четыре года) проверяется в международных сравнениях с эталонным прибором ВМО. За период с 1984 по 2009 гг. расхождения с результатами измерений на эталонном приборе ВМО не превышали 1%. Наблюдения в основном выполняются по прямому Солнцу, погрешность единичного измерения ОСО при этом не превышает 2%.

В фильтровых озонометрах М-124 используются УФ-светофильтры, выделяющие два спектральных диапазона шириной около 20 нм с максимумами на длинах волн 302 и 326 нм (Шаламянский, 1993). Многолетние измерения с помощью озонометра М-124 показали, что их погрешность единичного измерения ОСО не превышает 5–8%, а погрешность определения среднего за день значения ОСО составляет 3–4%. Наблюдения ОСО с помощью озонометра М-124 № 403, который является рабочим прибором на озонометрической станции Воейково, проводятся ежедневно (восемь сеансов в день). В ясные дни проводятся параллельные наблюдения на спектрофотометре

Добсона, и максимальные расхождения с этим прибором, как правило, не превышают 10 е.Д.

Особенности Фурье-спектрометра Bruker 125HR, используемого для измерений спектров прямого солнечного ИК-излучения с высоким разрешением в СПбГУ, подробно описаны в работе (Поберовский, 2010). Сам ИК-метод получения данных по ОСО из измеряемых спектров исследован в работе (Виролайнен и др., 2011), там же приведены потенциальные погрешности метода. Измерения в стабильных атмосферных условиях дают погрешность единичного измерения ОСО порядка 2–3%.

Спутниковый прибор OMI Ozone Monitoring Experiment (Levelt et al, 2006) продолжает серию сканирующих в горизонтальном направлении спектрометров для надирных измерений уходящего (отраженного и рассеянного) излучения в различных диапазонах спектра, таких как TOMS, GOME и SCIAMACHY. Прибор OMI работает на борту американского спутника AURA, запущенного в 2004 г. на околополярную солнечно-синхронную орбиту. На приборе выполняются измерения спектров уходящего излучения в области 270–500 нм с разрешением ~0.4 нм. Схема сканирования прибора OMI позволяет выполнять ежедневное глобальное картирование поля ОСО с пространственным разрешением в надире ~13 × 24 км². Чтобы продлить ряд многолетних измерений с помощью спутниковой аппаратуры TOMS (начаты в 1978 г.), для интерпретации данных измерений OMI используется алгоритм TOMS версии 8. Заявленная погрешность измерений ОСО с использованием этого алгоритма составляет менее 2% (Bhartia, 2002).

АНАЛИЗ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОСО

Для интерпретации ИК-измерений в настоящей работе использовался программный комплекс PROFFIT (Haze et al., 2004), разработанный в университете Карлсруэ (Германия) и использующийся на ряде станций международной измерительной сети NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change). Для каждого дня спектрометрических измерений задавалась метеорологическая информация (профили давления и температуры), полученная с помощью системы автоматической электронной почты NASA Goddard Space Center (<http://www.nasa.gov/centers/goddard/missions/index.html>), а также априорная информация о профилях атмосферных параметров по данным численной модели WACCM (The Whole Atmosphere Community Climate Model) (http://www.cesm.ucar.edu/working_groups/WACCM/).

В табл. 1 представлены общие данные по ИКФС, а также по характеристикам измерений и особенностям решения обратной задачи определения ОСО (спектральные каналы, разрешение,

Таблица 1. Характеристики измерений ИКФС и особенности их интерпретации

Параметр	Характеристика
Спектроскопия	HITRAN 2008
Профили температуры $T(p)$	Дневные профили NCEP
Программа интерпретации	PROFFIT 9.6
Используемые спектральные окна, см^{-1}	991.25-993.80
	1001.47-1003.04
	1005.00-1006.90
	1007.35-1009.00
Используемая климатология (априорные профили)	1011.15-1013.55
	WACCM (одна для всех сезонов)
Влияющие газы	H_2O , CO_2 , C_2H_4 , O_3 (668), O_3 (686)
Прибор	Фурье-спектрометр Bruker 125HR
Спектральное разрешение, см^{-1}	~0.005
Место измерений	Петергоф–Санкт-Петербург (59.88° с.ш., 29.82° в.д.)
Период измерений	04.2009–03.2012 (189 дн.)

Таблица 2. Сравнение наземных измерений с помощью приборов Добсона, ИКФС и М-124

Сопоставляемые приборы	Число сопоставлений	СК-расхождение, е.Д. (%)	Среднее расхождение, е.Д. (%)	СКО от среднего, е.Д. (%)	Коэффициент корреляции
Добсон–М124	78	8.8 (2.6)	1.9 (0.6)	8.7 (2.5)	0.97 ± 0.01
ИКФС–Добсон	74	12.8 (3.7)	5.0 (1.4)	11.9 (3.4)	0.95 ± 0.01
ИКФС–М124	186	16.6 (4.8)	9.8 (2.8)	13.5 (3.9)	0.96 ± 0.01

учитываемые газы, входные параметры). По всем имеющимся в наличии спектральным измерениям солнечного излучения в полосе поглощения озона 9.6 мкм (1190 спектров) нами были получены данные по ОСО в районе Санкт-Петербурга для 189 дней за период с апреля 2009 г. по март 2012 г. включительно. Для каждого из дней данные по отдельным измерениям суммировались и осреднялись. Число спектров, измеренных в различные дни, варьируется от 1 до 18.

Результаты сопоставлений измерений ОСО с помощью всех трех наземных методов приведены в табл. 2. Необходимо отметить, что число сопоставлений различается для отдельных пар методов из-за разного числа попарных измерений. Сопоставления проводились на уровне среднедневных значений и расчетах следующих трех характеристик рассогласований:

– среднеквадратическое рассогласование:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2};$$

– среднее рассогласование:

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i); \quad (1)$$

– стандартное отклонение от среднего рассогласования: $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i - M)^2}$.

При расчете рассогласований в % абсолютные значения в е.Д., приведенные в табл. 2, отнесены к средним по ансамблю измерениям ОСО первым из пары перечисленных в столбце 1 приборов. Анализируя табл. 2, можно видеть, что наилучшее согласие наблюдается между измерениями Добсона и М-124. Систематические отличия составляют только 1.9 е.Д., или 0.6%, СК – 8.8 е.Д., или 2.6%, СКО от среднего – 8.7 е.Д., или 2.5%. Такие малые отличия объясняются тем, что оба прибора измеряют ОСО в одном месте, и прибор М-124 калибруется с помощью измерений спектрофотометра Добсона. Сравнение измерений ОСО приборами ИКФС и Добсона показало наличие средних рассогласований в 5.0 е.Д. (1.4%), СК – 12.8 е.Д. (3.7%) и СК от среднего – 11.9 е.Д. (3.4%). При этом ИКФС дает более высокие значения ОСО по сравнению с Добсоном. Частично рассогласования можно объяснить отличиями в местах измерений (около 50 км). При сравнении измерений ИКФС и М-124 видно, что систематическое рассогласование увеличилось до 9.8 е.Д. (2.8%), СК – до 16.6 е.Д. (4.8%), СК от среднего – до 13.5 е.Д. (3.9%). Увеличение рассогласований

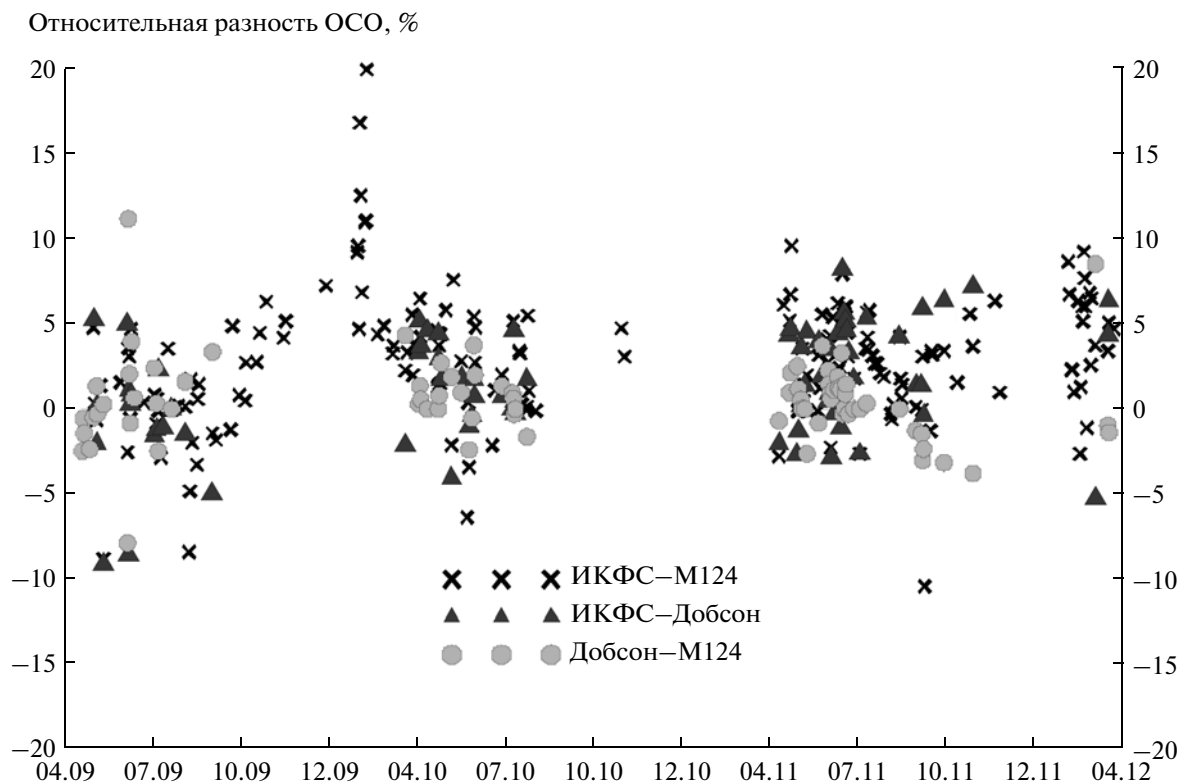


Рис. 1. Сезонный ход рассогласования данных по ОСО, полученных с помощью различных наземных приборов.

связано как с различиями в локализации мест измерений, так и с более низкой точностью измерений М-124. При этом для всех трех приборов наблюдаются высокие корреляции между попарными измерениями (коэффициент корреляции — 0.95–0.97).

Из таблицы хорошо видно, что измерения ИКФС завышают значения ОС по сравнению с данными измерений других наземных приборов. Подобный эффект обнаруживался и ранее при сравнениях УФ-измерений приборами Добсона и Брюера с измерениями ИКФС (Viatte et al., 2011) и объясняется несогласованностью количественных характеристиках молекулярного поглощения озона в УФ- и ИК-областях спектра.

Приведенные выше статистические характеристики относятся ко всему периоду наблюдений. Представляет интерес рассмотреть особенности временного хода результатов сравнения. На рис. 1 показан сезонный ход относительного рассогласования данных по ОСО, полученных с помощью различных наземных приборов. Данные приведены для тех дней, когда имелись в наличии попарные измерения разных приборов. Из табл. 2 видно, что для пары ИКФС–М-124 это 186 дней, для пары ИКФС–Добсон — 74 дня и для пары Добсон–М-124 — 78 дней. Из рисунка видно, что основные дни для сравнений приходятся на

летний период, так как измерения и Добсоном и ИКФС проводятся в солнечные безоблачные дни.

Анализируя рис. 1, можно отметить, что за весь период измерений (три года) систематическое рассогласование между измерениями Добсона и М-124 не меняется, измерения ОСО по Добсону превышают измерения М-124 примерно на 0.6% (см. табл. 2). В то же время наблюдается рост среднего рассогласования между измерениями ИКФС и другими приборами. Если в 2009 г. разность ИКФС — другие приборы составляла для Добсона около нуля, для М-124 около 2%, то к 2012 г. эта разность возросла до 3.5% (в среднем 1.4% и 2.8% соответственно — см. табл. 2). Этот рост систематической разности может быть связан как с изменением режима работы прибора ИКФС, так и с особенностями выборки для сравнения. Так, в выборке практически отсутствуют совместные измерения различных приборов за период осень 2010–весна 2011 и зима 2011/2012 гг. Выбросы в разности ИКФС — М-124 на рис. 1, превышающие 10% в январе 2010 г., связаны, по всей видимости, с особенностями измерения прибора М-124 в это время, поскольку, как будет показано далее, аналогичные рассогласования наблюдаются в этот период и при сравнении данных М-124 с данными спутникового прибора OMI.

На рис. 2 приведены корреляции между значениями ОСО, полученными с помощью различных

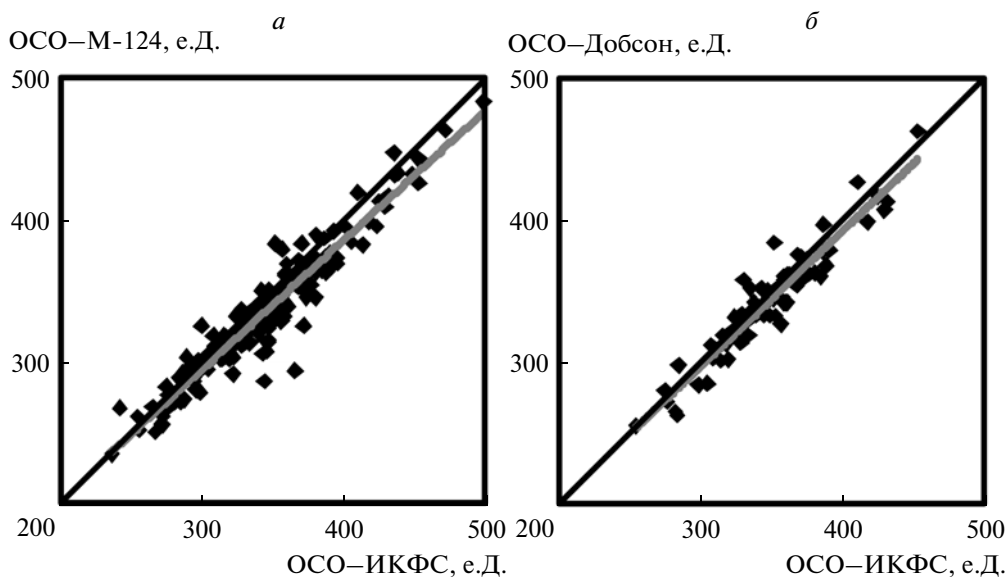


Рис. 2. Корреляции значений ОСО, полученных в 2009–2012 гг. с помощью: *а* – приборов ИКФС и М-124; *б* – ИКФС и спектрофотометра Добсона.

наземных приборов за весь период сопоставлений. Слева – корреляции между ИКФС и М-124, справа – между ИКФС и Добсоном. Также на каждом из рисунков проведена прямая – линейное приближение результатов сопоставлений. Наклон этой прямой для пары ИКФС–Добсон составляет 0.96, для пары ИКФС–М-124 – 0.91. Видно, что при сравнении результатов измерений приборами ИКФС и М-124 систематическое превышение данных ИКФС, обнаруженное ранее, наблюдается, как правило, для высоких значений ОСО. Несколько отдельных выбросов для средних значений величины ОСО могут иметь случайный характер. Для пары ИКФС–Добсон такой явной картины не наблюдается. Таким образом, систематическое расхождение в измерениях ИКФС и М-124 может иметь место вследствие менее точных измерений ОСО прибором М-124.

В целом по результатам сравнения данных измерений ОСО ИКФС (Петергоф, СПбГУ) с данными независимых наземных измерений в Воейково можно сделать вывод о том, что интерферометрические измерения лучше согласуются с прибором Добсона, чем с М-124. Учитывая полученные оценки согласования двух приборов и тот факт, что Добсон является эталонным прибором для измерения ОСО, можно в дальнейшем рекомендовать использовать ИКФС для валидации спутниковых измерений.

СРАВНЕНИЕ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОСО

Первые результаты обширных сравнений наземных измерений ОСО приборами Добсона и Брюера и данными спутникового прибора ОМІ

приведены в работе (Balis et al., 2007). Они показали хорошее согласие наземных и спутниковых измерений (в пределах 1%) при использовании алгоритмов TOMS в сравнениях с 18 приборами, измерявшими ОСО в Европе, Канаде, Японии, США и Антарктиде. В работе (McPeters et al., 2008) проведено сравнение измерений ОМІ с 76 наземными станциями измерений ОСО приборами Добсона и Брюера, функционировавшими в Северном полушарии. Эти сопоставления показали, что в среднем спутниковые измерения дают значения выше наземных измерений на 0.4%. В работе (Vuchard et al., 2008) проведенные сопоставления ОМІ с результатами наземных измерений на двух французских наземных станциях показали отличия в пределах 5%. В работе (Ialongo et al., 2008) проведено сравнение данных измерений ОСО ОМІ с наземными измерениями в Риме и обнаружено хорошее согласие для разнообразных условий измерений с систематическими отличиями в 1.8%. Сравнения данных ОМІ с наземными измерениями прибором Брюера на пяти испанских станциях показали в целом очень хорошее согласие, но наблюдалось превышение спутниковых значений ОСО примерно на 2%. Максимальные значения расхождений достигали 5% с заметным сезонным ходом (Anton et al., 2009).

В настоящей работе наземные измерения ОСО приборами ИКФС (Петергоф), М-124 и Добсона (станция ГГО в п. Воейково) были сопоставлены с данными спутниковых измерений с помощью прибора ОМІ. Как уже упоминалось выше, для интерпретации данных измерений ОМІ используется алгоритм TOMS версии 8. В этом алгоритме используются данные измерений уходящего излучения в нескольких спектральных каналах УФ-об-

Таблица 3. Сравнение наземных измерений ОСО с данными спутникового прибора ОМІ

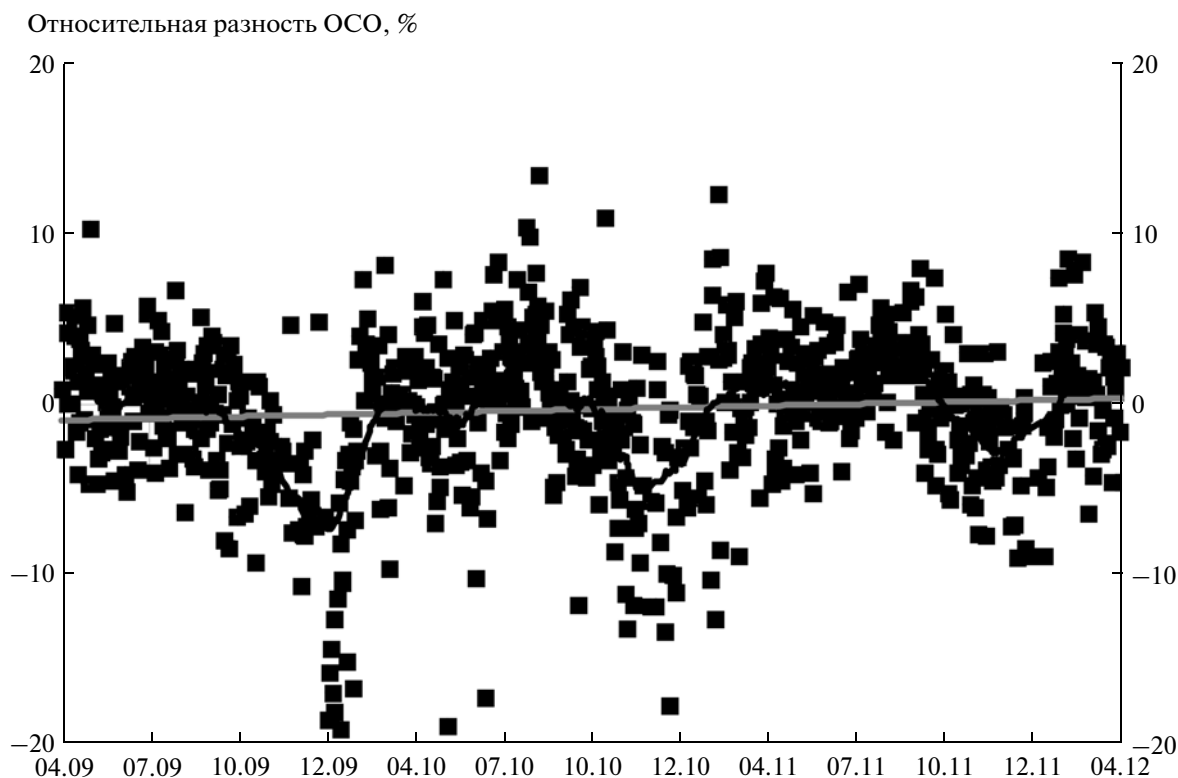
Сопоставляемые приборы	Число сопоставлений	СК-расхождение, е.Д. (%)	Среднее расхождение, е.Д. (%)	СКО от среднего, е.Д. (%)	Коэффициент корреляции
Добсон—ОМІ	75	11.5 (3.3)	5.5 (1.6)	10.1 (2.9)	0.96 ± 0.01
М-124—ОМІ	850	14.8 (4.5)	-0.47 (-0.14)	14.8 (4.5)	0.96 ± 0.01
ИКФС—ОМІ	178	15.5 (4.5)	11.8 (3.4)	10.0 (2.9)	0.98 ± 0.01

ласти (~310–360 нм) с разрешением ~1 нм. Методика основана на регрессионном подходе: с помощью радиационной модели поле уходящего излучения рассчитывается заранее для различных значений содержания озона при разных условиях наблюдений и различных параметрах атмосферы и подстилающей поверхности. Затем по результатам измерений определяется соответствующая этому излучению величина ОСО (McPeters et al., 1998). Данные по измерениям ОМІ были взяты из открытого доступа с сайта <http://avdc.gsfc.nasa.gov/index.php?site=1593048672&id=28> для станции Санкт-Петербург.

Сопоставление наземных и спутниковых данных проводилось нами за 2009–2012 гг. – период функционирования прибора ИКФС в Петергофе. При отборе спутниковых измерений осреднялись данные, полученные в радиусе 500 км от места наземных измерений. В табл. 3 приведены статистические характеристики ансамблей измерений

ОСО наземными приборами и спутниковым прибором ОМІ – среднее расхождение, СК-расхождение, СК-отклонение от среднего (1). Ансамбли отличаются по величине выборки, так как сравниваются данные имеющихся в наличии попарных измерений различных. Здесь, как и ранее, при расчете рассогласований в % абсолютные значения в е.Д. отнесены к средним по ансамблю измерениям ОСО первым из пары перечисленных в столбце 1 приборов.

Анализируя среднее расхождение, можно видеть, что Добсон систематически завышает значения ОСО по сравнению с ОМІ на величину порядка 5.5 е.Д. (1.6%), ИКФС – на величину порядка 11.8 е.Д. (3.4%). М-124 систематического рассогласования со спутниковыми данными не имеет, однако сравнение результатов измерений ОСО этими двумя приборами проводилось в течение всех сезонов (850 дней за три года), в то время как остальные наземные приборы измеряли в

**Рис. 3.** Сезонный ход рассогласования данных по ОСО—(М-124)—ОМІ.

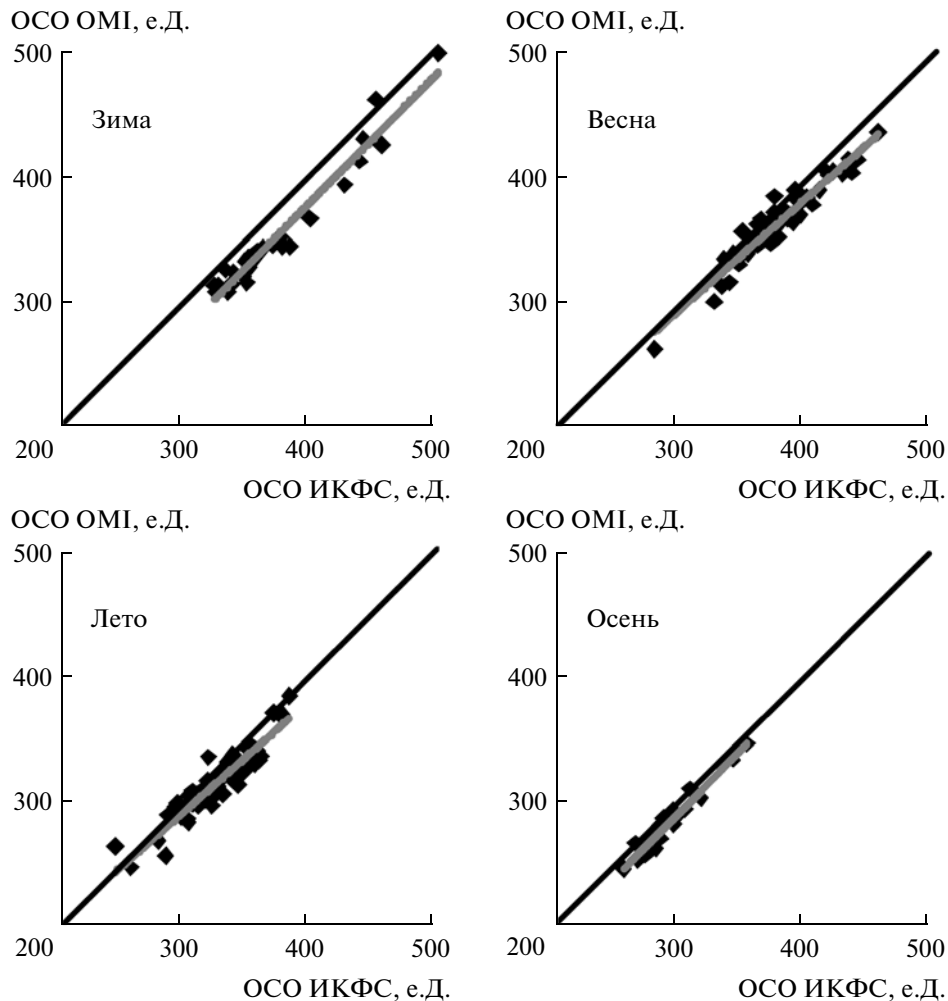


Рис. 4. Корреляции значений ОСО, полученных с помощью приборов ИКФС и ОМІ для различных сезонов 2009–2012 гг.

основном в весенне-летний период. При этом интересно отметить, что СК-отклонение от среднего, частично характеризующее погрешность измерения приборов, для Добсона и ИКФС в сравнении с ОМІ одинакова и равна 10 е.Д. (2.9%). Для М-124 СК-отклонение от среднего составляет 14.8 е.Д. (4.5%), что говорит о большей величине погрешности измерения этого наземного прибора. Коэффициент корреляции наземных и спутниковых измерений ОСО для всех ансамблей равен 0.96 (М-124 и Добсон) и 0.98 (ИКФС).

Чтобы понять особенности систематического рассогласования спутниковых и наземных измерений, проанализируем сезонный ход относительного расхождения данных М-124 и ОМІ, приведенный на рис. 3. Данные приведены за период апрель 2009 г.—апрель 2012 г. На рисунке, кроме того, дополнительно приведена прямая — линейная интерполяция результатов, демонстрирующая тренд в рассогласованиях за исследуемый период, и кривая — скользящее среднее, которая

позволяет отследить сезонный ход расхождений. Систематических отличий данных за весь период практически не наблюдается (среднее меняется от -0.9% в 2009 до 0.2% в 2012 г.). В то же время наблюдается ярко выраженный сезонный ход рассогласований. В зимний период наземные данные систематически меньше спутниковых данных по ОСО, в летний период, наоборот, данные М-124 завышены по сравнению со спутниковыми данными (в июле—сентябре — до 5%). В целом наблюдается уменьшение рассогласований в зимний период с течением времени. Так, зимой 2009/2010 средние расхождения достигали 7% , зимой 2010/2011 — 5% , 2011/2012 — 3% . Это может быть связано как с разным характером зим, так и с повышением точности измерений приборов.

Нами была также проанализирована статистика не только за весь период измерений, но и отдельно по сезонам. Так, для осени и зимы среднее расхождение М-124 и ОМІ (1) равно -3.8 и -4.6 е.Д. соответственно. Для весны и лета — 2.2 и 4.9 е.Д. соот-

ответственно. Все эти средние лежат в пределах $\pm 1.5\%$. СК-отклонение от среднего для этих двух приборов максимален в зимний период – до 6.6% (22.4 е.Д.). В остальные сезоны оно равно $3.7\text{--}4.2\%$ (11–13 е.Д.). Можно сделать вывод о том, что зимой точность измерения ОСО ниже всего, что связано, вероятно, с использованием М-124 в зимний период в режиме рассеяния и низкими углами Солнца, из-за чего возрастает погрешность измерений.

Анализируя те же данные для пары ИКФС–ОМІ, можно отметить, что зимой максимально среднее расхождение, данные по ОСО ИКФС превышают в среднем данные ОМІ на 5.5% (20 е.Д.). В то же время не наблюдается изменений СК-отклонения от среднего, оно составляет $2\text{--}3\%$ для всех сезонов. Это говорит о стабильной работе прибора ИКФС в течение всего года. Систематические различия со спутниками зимой могут быть частично связаны с тем, что во время измерений при низком Солнце измерения ОСО происходит в различных воздушных массах для спутниковых и наземных приборов. Отметим, что корреляции между ансамблями для всех сезонов меняются незначительно, составляя $0.93\text{--}0.97$.

В заключение сравнения ансамблей ИКФС и ОМІ по сезонам приведем рис. 4, на котором представлены корреляции измерений ОСО для различных сезонов в 2009–2012 гг. Из рисунка хорошо видно систематическое расхождение в зимний период, весной и летом некоторый рост систематики наблюдается при более высоких значениях ОСО, осенью – систематическое и СК-рассогласования между данными двух приборов минимальны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе были проанализированы ансамбли измерений ОСО в районе Санкт-Петербурга, выполненные с помощью наземных приборов ИКФС (Петергоф, СПбГУ), М-124 и Добсона (станция ГГО в п. Воейково), а также с помощью спутникового прибора ОМІ за период апрель 2009–апрель 2012 гг. На основании проведенного исследования по сопоставлению ансамблей по ОСО были получены следующие результаты и сделаны следующие выводы:

1) данные измерения ОСО наземным прибором ИКФС лучше согласуются с данными эталонного прибора – спектрофотометра Добсона (среднее расхождение 1.4% , СК-отклонение от среднего – 3.4%), чем с данными М-124 (среднее расхождение – 2.8% , СК от среднего – 3.9%);

2) при сопоставлении наземных измерений ОСО прибором М-124 и спутниковых измерений прибором ОМІ (850 дней измерений) обнаружен сезонный ход рассогласований между двумя сериями измерений. Осенью и зимой наземный прибор занижает данные по ОСО по сравнению со спутни-

ковым прибором в среднем на 1.5% ; весной и летом, наоборот, завышает на те же 1.5% . СК-отклонения от среднего максимальны зимой – до 6.6% , в остальное время – $3.5\text{--}4\%$. Рост расхождений зимой, вероятно, связан с увеличением погрешностей измерений приборами в зимнее время;

3) сопоставление данных ИКФС и ОМІ (178 дней измерений) продемонстрировало систематическое завышение данных наземных измерений по сравнению со спутниковыми, которое максимально для зимнего периода – 5.5% (для остальных сезонов – около 3%). СК-отклонение от среднего для всех сезонов стабильно и составляет $2\text{--}3\%$;

4) учитывая пространственно-временное рассогласование независимых ансамблей измерений, анализ СК-расхождений между наземными и спутниковыми данными, прибор ИКФС, функционирующий в СПбГУ, может быть рекомендован для валидации спутниковых измерений ОСО в районе Санкт-Петербурга.

Работа выполнена при поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” (госконтракты № П969 от 27.05.2010 и № 16.740.11.0048 от 31.08.2010), НИР СПбГУ № 11.31.547.2010 и 11.37.28.2011, грантов РФФИ 12-05-00596 и 12-05-00445-а.

Авторы благодарят А.М. Шаламянского за предоставленные данные измерений ОСО со станции ГГО пос. Воейково.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виролайн Я.А., Тимофеев Ю.М., Ионов Д.В., Поберовский А.В., Шаламянский А.М.* Наземные измерения общего содержания озона ИК-методом // Изв. РАН. ФАО. 2011. Т. 47. № 4. С. 521–532.
- Гущин Г.П., Соколенко С.А.* Новый малогабаритный озонометр М-124, предназначенный для измерения суммарного озона // Атмосферный озон. Тр. VI Всес. симп. 15–17 мая 1985 г. Ленинград. Л.: Гидрометеиздат, 1987. С. 49–56.
- Перов С.П., Хргиан А.Х.* Современные проблемы атмосферного озона. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 287 с.
- Поберовский А.В.* Наземные измерения ИК-спектров солнечного излучения с высоким спектральным разрешением // Оптика атм. и океана. 2010. Т. 23. № 1. С. 58–64.
- Тимофеев Ю.М.* Глобальная система мониторинга параметров атмосферы и поверхности. Учебное пособие. СПб: Изд-во СПбГУ, 2010. 129 с.
- Шаламянский А.М.* Озонометрическая сеть СНГ // Метеорол. и гидрол. 1993. № 9. С. 100–104.
- Anton M., Lopez M., Vilaplana J.M., Kroon M., McPeters R., Bañón 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. № D14307. doi:10.1029/2009JD012003.
- Balis D., Lambert J.-C., Van Roozendaal M., Spurr R., Loyola D., Livschitz Y., Valks P., Amiridis V., Gerard P.,*

- Granville J., Zehner C.* Ten years of GOME/ERS2 total ozone data – The new GOME data processor (GDP) version 4: 2. Ground-based validation and comparisons with TOMS V7/V8 // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. № D07307. doi:10.1029/2005JD006376.
- Bhartia P.K.* OMI Ozone Products. Vol. 2. OMI Algorithm Theoretical Basis Document // NASA Techn. Publ. Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA, 2002. Rep. № ATBD-OMI-02. 91 p.
- Brewer A.W.* A replacement for the Dobson spectrophotometer // *Pure Appl. Geophys.* 1973. V. 106. № 1. P. 919–927.
- Buchard V., Brogniez C., Auriol F., Bonnel B., Lenoble J., Tanskanen A., Bojkov B., Veefkind P.* Comparison of OMI ozone and UV irradiance data with ground-based measurements at two French sites // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. № 8. P. 4517–4528. <http://www.atmos-chem-phys.net/8/4517/2008/>.
- Dobson G.M.B.* Observers' handbook for the ozone spectrophotometer // *Ann. IGY. Pt 1.* Pergamon Press, 1957. P. 46–89.
- Hase F., Hannigan J.W., Coffey M.T., Goldman A., Hopfner 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. Rad. Transf.* 2004. № 87. P. 25–52.
- 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. Discuss.* 2008. № 8. P. 2381–2401. www.atmos-chem-phys-discuss.net/8/2381/2008/
- Levelt P., Hilsenrath E., Leppelmeier G., van den Oord G.H., Bhartia P., Tamminen J., Haan J.F., Veefkind J.P.* Science objectives of the Ozone Monitoring Instrument // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2006. V. 44. № 5. IGRSD2. P. 1199–1208.
- McPeters R.D., Bhartia P.K., Krueger A.J., Herman J.R., Wellemeyer C.G., Seftor G.J., Jaross G., Torres O., Moy L., Labow G., Byerly W., Taylor S.L., Swisler T., Cebula R.P.* Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) data products user's guide // NASA Techn. Publ. Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA, 1998. Rep. № 1998–206895. 69 p.
- 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. № D15S14. doi:10.1029/2007JD008802.
- Viatte C., Schneider M., Redondas A., Hase F., Eremenko 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. № 4. P. 535–546. doi:10.5194/amt-4-535-2011. www.atmos-meas-tech.net/4/535/2011/
- WMO: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002 // Global Ozone Research and Monitoring Project—Report № 47. Geneva, 2003.

Inter-Comparison of Satellite and Ground-Based Ozone Total Column Measurements

Ya. A. Virolainen, Yu. M. Timofeyev, A. V. Poberovsky

The Faculty of Physics, St. Petersburg State University

The series of ozone total column (OTC) measurements made in 2009–2012 near St. Petersburg by ground-based IR Fourier spectrometer (FTIR) (Peterhof, SPbSU), filter ozonometer M-124 and Dobson spectrophotometer (Voeykovo, MGO) and OMI (AURA satellite) have been analyzed and compared. It has been shown that standard deviation between series of measurements for all devices totals 2.5–4.5%. FTIR and Dobson which measure the direct sun are in better agreement with OMI than M-124 which measure the scattered solar radiation as well. The seasonal cycle in discrepancy between M-124 and OMI measurements (for 850 days) with 1.5% amplitude has been detected. In autumn and winter ground-based measurements give lower OTC values than satellite, in spring and summer – vice versa. Also, it has been shown that FTIR measurements systematically give higher values of OTC than other devices from 1.4% (for Dobson) up to 3.4% (for OMI). Taking into account the spatial and temporal discrepancy of measurements, standard deviation between series of satellite and ground-based measurements, FTIR spectrometer of SPbSU can be recommended for ozone satellite data validation.

Keywords: total ozone column, atmospheric remote sensing methods, Fourier-spectroscopy, satellite measurements validation