

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

УДК 621.371:551.510

**СРАВНЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ (АППАРАТУРА GOME, TOMS)
И НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА**

© 2002 г. Д. В. Ионов*, Ю. М. Тимофеев, А. М. Шаламянский

Научно-исследовательский институт физики Санкт-Петербургского государственного университета

**Тел.: (812)428-43-47; e-mail:ionov@troll.phys.spbu.ru*

Поступила в редакцию 16.04.2001 г.

Представлен обзор результатов международных экспериментов по валидации измерений общего содержания озона (ОСО) прибором GOME, отражающий противоречивость полученных результатов. Приведены данные новых сопоставлений измерений GOME с независимыми наземными измерениями различными приборами – спектрофотометры Добсона и Брюера, озонметр M-124. Результаты многочисленных сопоставлений оперативных данных GOME об ОСО с данными независимых наземных измерений российской озонметрической сети в 1996–2000 гг. выявляют систематическое занижение величины ОСО в данным GOME (4–9%), заметное и при сопоставлениях с данными одновременных измерений TOMS. Отмечено постепенное уменьшение выявленных систематических расхождений при использовании данных GOME новых версий обработки (версии 2.4, 2.7).

ВВЕДЕНИЕ

Измерения общего содержания озона (ОСО) уже длительное время осуществляются наземными и спутниковыми методами [1–6]. С помощью наземных измерений (в основном спектрометрами Добсона и Брюера, фильтрового озонметра M-124) получен большой массив данных, используемый для решения различных научных и прикладных задач физики и химии атмосферы Земли. С середины 60-х годов все большую роль в получении информации об ОСО начинают играть спутниковые методы – прежде всего метод, основанный на интерпретации измерений отраженного и рассеянного солнечного излучения в УФ-области спектра (аппаратура TOMS и SBUV), а также метод, использующий измерения теплового излучения атмосферы в районе полосы поглощения 9.6 мкм [6]. Возможности получения с помощью спутниковых методов практически глобальной информации об ОСО сделали эти измерения чрезвычайно важными в исследовании разнообразных аспектов динамики озона, его связей с различными параметрами атмосферы, изменениями солнечной активности, в изучении многолетних трендов ОСО и факторов, их обуславливающих, и т.д.

Появление двух систем измерений ОСО – наземной и спутниковой – выдвинуло на первый план задачу их взаимной калибровки, тем более, что в процессе эксплуатации спутниковых систем были обнаружены тренды в показаниях таких приборов, как TOMS и SBUV, связанные с изменением характеристик измерительной аппаратуры. В дальнейшем этой проблеме было посвяще-

но большое внимание (см., например, монографию [5] и отчеты [7–10]).

Актуальность современных исследований содержания озона в атмосфере, обусловленная наблюдающимися в последние десятилетия его уменьшениями в стратосфере и трендами разных знаков в тропосфере с возможным влиянием этих процессов на климат Земли и ее биосферу [11], стимулировала разработку и использование новых спутниковых приборов для глобального мониторинга общего содержания озона. Та, на европейском спутнике ERS-2 с апреля 1995 г. функционирует многоканальный спектрометр GOME, важнейшей задачей которого является глобальное картирование ОСО [12]. По сравнению с известными спутниковыми приборами TOMS и SBUV, успешно используемыми для исследования озоносферы уже многие годы, этот прибор представляет собой аппаратуру нового поколения. Одно из основных отличий спектрометра GOME от приборов TOMS и SBUV состоит в резком увеличении числа измерительных спектральных каналов, используемых для определения ОСО.

Существуют и значительные отличия в методике оперативной интерпретации измерений приборов TOMS и GOME. В первом случае используются предварительно рассчитанные (на основе строгой теории переноса УФ-излучения в атмосфере) таблицы уходящего излучения для различных моделей атмосферы. Широкий диапазон спектра и высокое спектральное разрешение прибора GOME позволяют использовать для восстановления общего содержания ряда газовых составляющих алгоритм DOAS (Differential Optical

Absorption Spectroscopy) [13]. Методика DOAS основана на интерпретации дифференциальной структуры спектров поглощения атмосферных газов и состоит в минимизации расхождений между результатами измерений и линейной комбинацией эталонных спектров молекулярного поглощения после вычета широких спектральных составляющих, связанных с рассеянием, альбедо поверхности, эффектом Ринга (комбинационное рассеяние) и слабо меняющимися по спектру компонентами поглощения. На первом этапе в этом случае методом наименьших квадратов определяется ОСО для трассы формирования уходящего излучения, а затем, используя рассчитанные заранее для различных условий измерений значения воздушных масс, определяется ОСО в вертикальном столбе атмосферы. Основные трудности при этом возникают именно в “прогнозе” значений воздушных масс, соответствующих реальному состоянию атмосферы и конкретным условиям спутникового эксперимента. Алгоритм DOAS ранее успешно применялся для обработки результатов наземных, самолетных и зондовых измерений (см. например, [14]). Тем не менее GOME – первый эксперимент, в котором эта методика используется для оперативного восстановления газового состава атмосферы по измерениям уходящего рассеянного и отраженного излучения из космоса.

Как было показано во многих работах (см., например, [15]), потенциальная точность измерений ОСО с помощью прибора GOME очень высока – менее 1%. Важно отметить, что подобные оценки характеризуют максимально возможные точности спутниковых измерений. Реальные погрешности восстановления оказываются существенно большими, так как зависят от многих факторов, учет которых не осуществляется, как правило, при расчетах потенциальной точности (например, реальных характеристик действующей в космосе аппаратуры).

Каждый спутниковый эксперимент включает в себя специальные исследования, призванные оценить реальную точность измерений и характеристики извлекаемых данных. Так называемые “кампании по валидации” носят характер координированных сопоставлений спутниковых данных с данными разнообразных независимых измерений с участием многочисленных научно-исследовательских групп из разных стран, обладающих опытом как в дистанционных измерениях, так и в их интерпретации. При этом валидация спутниковых данных позволяет не только обнаружить погрешности в работе прибора или методиках первичной и вторичной обработки результатов измерений, но также выявить возможные причины этих ошибок и дать рекомендации по совершенствованию системы оперативной обработки. В связи с этим, а также с необходимостью проведения

взаимокалибровки различных систем измерений ОСО с начала функционирования спутникового прибора GOME были проведены многочисленные сопоставления его измерений с другими системами измерений – наземными и космическими [16].

В данной работе анализируются многочисленные эксперименты по валидации измерений ОСО прибором GOME, приводятся новые данные сопоставлений этих измерений с независимыми наземными измерениями различными приборами – спектрофотометры Добсона и Брюера, озонметр М-124. На основе проведенных исследований делаются выводы о согласованности различных систем измерений ОСО и, в частности, о качестве измерений ОСО с помощью спектрометра GOME.

ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ КАМПАНИИ ПО ВАЛИДАЦИИ ДАННЫХ GOME ОБ ОСО

В табл. 1 обобщены основные результаты сопоставлений измерений ОСО прибором GOME, осуществленных в 1995–1997 гг. разными коллективами авторов. В ней приведены районы и периоды сопоставлений, используемые измерительные системы и основные выводы сопоставлений. Проведем краткий анализ полученных результатов.

В работе [17] данные GOME о глобальном распределении ОСО, собранные более чем за год (8/96–8/97), сопоставлялись с данными измерений TOMS со спутника Earth Probe. Для сопоставлений данные обеих измерительных систем усреднялись по широтам и месяцам наблюдений. В целом среднеквадратичное расхождение среднемесячных значений ОСО, наблюдаемых приборами GOME и TOMS, составляло не более 4%, причем разница TOMS–GOME может быть как положительной, так и отрицательной. В высоких широтах GOME дает более низкие значения ОСО по сравнению с результатами измерений TOMS (до 8%). Отмечается, что в условиях истощения озонового слоя атмосферы (зима/весна в Северном или лето/осень в Южном полушарии) GOME завышает значения ОСО по сравнению с TOMS более чем на 15%.

Работа [18] посвящена сравнению данных об ОСО аппаратуры GOME с результатами измерений прибора TOVS (TIROS Operational Vertical Sounder, спутник NOAA) для двух периодов времени: 25/8–9/9/95, 11/1–17/1/96 (23 дня). Рассматривались сопоставления данных GOME с картами распределений ОСО по наблюдениям TOVS с последующим усреднением результатов для широтных зон шириной 10° (от 60° ю.ш., до 60° с.ш.), а также сопоставления данных GOME с данными TOVS, относящимися к станциям системы наземного мониторинга ОСО в северном полушарии (NHGOS: Northern Hemisphere Ground Ozone monitoring Stations). Для обоих типов сопоставлений

Таблица 1. Основные результаты сопоставлений измерений ОСО прибором GOME, осуществленных в 1995–1997 гг

Литература	Район сопоставлений	Период сопоставлений	Данные об ОСО (*)	Расхождение GOME – (*)	Примечания
[17]	Глобально 85° ю.ш.–85° с.ш.	8/96–8/97	TOMS	–8/+15%	В высоких широтах GOME < (*); при низком ОСО GOME > (*)
[18]	Глобально 60° ю.ш.–60° с.ш.	25/8–9/9/95, 11/1–17/1/96 (23 дня)	TOVS	–35Е.Д.	GOME < (*)
[19]	53°N, 9°E (Bremen)	7–8/96	DOAS (наземные)	до –10%	GOME < (*)
[20]	44°–48° с.ш., 1° з.д.–11° в.д. (6 станций)	22/7–13/12/95 (45 дней)	Dobson, Brewen, SAOZ (наземные)	–2%/–8	GOME < (*)
[21]	Глобально 67° ю.ш.–79° с.ш., 70° з.д.–172° в.д. (16 станций)	22/7–13/12/95 (45 дней)	SAOZ (наземные)	–12%/+15%	В высоких широтах GOME < (*); при низком ОСО, в тропиках GOME > (*);
[22]	Глобально 67° ю.ш.–79° с.ш., 70° з.д.–172° в.д. (16 станций)	28/6–15/12/96	ZAOZ (наземные)	–8%/+10%	При низком Солнце GOME < (*); при низком ОСО, в Антарктике GOME > (*);
[23]	Глобально 67° ю.ш.–79° с.ш., 70° з.д.–172° в.д. (16 станций)	28/6/96–30/4/97	SAOZ (наземные)	–10%/+10%	При высоком ОСО GOME < (*); при низком ОСО GOME > (*);
[24]	50° с.ш., 4° в.д. (Uccle)	22/7–13/12/95 (45 дней)	Dobson, Brewer (наземные)	–1.7%/–2.5%	GOME < (*)
[25]	46° с.ш., 9° в.д. (Arosa)	7/95–12/95 (45 дней)	Dobson, Brewer (наземные)	–1.3%/–3.0%	GOME < (*)
[26]	53° с.ш., 9° в.д. (Bremen) 79° с.ш., 12° в.д. (Ny-Alecund)	7/95–12/95 (45 дней)	DOAS (наземные)	–3%/–6%	GOME < (*)
[27]	44° с.ш., 11° в.д. (Modena)	11/8–13/12/95 (19 дней)	Sobson (наземные)	–3.5%	GOME < (*)
[28]	59°–78° с.ш., 9°–20° в.д. (8 станций) 53° ю.ш., 71° з.д. (Punta-Arenas)	22/7–13/12/95 (45 дней)	Dobson, Brewer, GUV (наземные)	–3%/–12%	GOME < (*); На станции Punta-Arenas GOME > (*);
[29]	52° с.ш., 5° в.д. (De Bilt)	23/7–30/10/95 (34 дня)	Brewer (наземные)	–4%/–5%	GOME < (*)
[30]	78° ю.ш., 167° в.д. (Arrival Heights)	18/9–7/12/95 (16 дней)	Dobson (наземные)	–23/54 Е.Д.	
[31]	44° с.ш., 6° в.д. (Haute Provence)	26/8–17/9/95 (15 дней)	Dobson, SAOZ, DOAS (наземные)	–0.8/–6.3%	GOME < (*)

GOME дает меньшие значения ОСО по сравнению с измерениями TOVS. В первом случае среднеквадратичное расхождение TOVS–GOME составляет около 35 Е.Д., причем рассогласование растет в высоких широтах северного полушария.

В сопоставлении второго типа среднеквадратичное расхождение TOVS–GOME составляет около 10 Е.Д.

В работе [19] приводятся результаты сопоставления данных GOME об ОСО за два месяца

1996 г. (июль и август) с результатами наземных измерений ОСО по методике DOAS в Бремени (53° с.ш., 9° в.д.). Прибор GOME дает меньшие значения ОСО по сравнению с наземными; эти расхождения растут с зенитным углом Солнца и достигают 10% (при угле Солнца менее 60° разница не превышает 5%).

Сравнению данных измерений ОСО прибором GOME с результатами наземных наблюдений на станциях Системы мониторинга изменений в стратосфере (NDSC: Network for the Detection of Stratospheric Changes) посвящена работа [20]. Исследуемый период наблюдений – 22/7–13/12/95 (45 дней). Шесть станций наземных измерений NDSC оснащены приборами Добсона, Брюера и SAOZ (Systeme d'Analyse par Observations Zenithales) и расположены в области 44°–48° с.ш. и 1° з.д.–11° в.д. Данные GOME оказались ниже наземных измерений ОСО; разница составляет от 2 до 8% и увеличивается с ростом зенитного угла Солнца (менее 2% при угле Солнца ниже 45°, 4% при 55° и 8% при 70°).

В работе [21] сопоставления данных GOME с данными наземных SAOZ-измерений, проведенные в исследовании [20], распространены на большее число станций – 16 станций в разных точках земного шара (67° ю.ш.–79° с.ш., 70° з.д.–172° в.д.). Измерения GOME дают в среднем на 5% бóльшие значения ОСО, чем наземные измерения при высоком Солнце и низком ОСО в тропиках; при увеличении широты разница уменьшается и достигает – 12% на 60° с.ш. при угле Солнца 70°. При угле Солнца более 75° данные GOME превышают результаты наземных измерений ОСО более чем на 15%. В аналогичном исследовании [22] проанализирован ряд наблюдений GOME в период с 28/6–15/12/96. При углах Солнца менее 70° среднее расхождение между данными GOME и результатами наземных измерений не превышает $\pm 4\%$. При низком Солнце ($>70^\circ$) измерения GOME занижают величину ОСО по сравнению с данными наземных наблюдений в среднем на 8%. Сопоставление данных GOME с наземными наблюдениями в Антарктике, в условиях “озоновой дыры” выявили завышение GOME величины ОСО в среднем на 10%. Наконец, в работе [23] рассмотрен ряд наблюдений GOME в период с 28/6/96–30/4/97. В тропиках и средних широтах расхождение между данными GOME и наземными измерениями составило менее $\pm 4\%$. В Арктике, при углах Солнца до 70° расхождение сохраняется в пределах $\pm 4\%$, а при низком Солнце (70°–85°) в осенне-летний период возрастает до 5–10%. Дополнительные сопоставления данных GOME с измерениями в Антарктике позволяют сделать общий вывод о систематическом занижении прибором GOME высоких и завышении низких значений ОСО.

Исследование [24] посвящено сопоставлению данных GOME об ОСО за период 22/7–13/12/95 (45 дней) с данными наземных измерений приборами Добсона и Брюера на станции “Uccle” (50.5° с.ш., 4.2° в.д., Бельгия). По сравнению с наземными измерениями GOME дает несколько меньшие значения ОСО. Наблюдаемые средние расхождения GOME-Dobson и SOME-Brewer составили –1.7% и –2.5% соответственно.

В работе [25] сопоставляются данные измерений ОСО прибором GOME в период 7/95–12/95 (34 дня) с данными наземных измерений приборами Добсона (D62, D101) и Брюера (B40) на станции Ароза (Arosa, 46° с.ш., 9° в.д.; Швейцария). GOME несколько занижает значения ОСО по сравнению с наземными измерениями. Средние расхождения проведенных сопоставлений составили: GOME-D62 – –2.80%, GOME-D101 – –3.03% и GOME-B40 – –1.34%.

В исследовании [26] данные GOME в период 7/95–12/95 сравниваются с данными наземных DOAS-измерений ОСО (погрешность менее 8%) на станциях в Бремене (53.1° с.ш., 8.9° в.д.) и “Ny-Alesund” (78.9° с.ш., 11.9° в.д.) и с данными озонозондовых измерений (погрешность ОСО менее 5%) на станции “Neumayer” (70.6° ю.ш., 8.4° з.д.). Для сопоставлений с наземными DOAS-измерениями отбирались данные измерений GOME, характеризующиеся зенитным углом Солнца менее 75° (44 дня измерений). Из данных озонозондовых измерений были использованы результаты наблюдений в течение трех дней (1, 7 и 11/10/95). Значения ОСО, полученные по измерениям GOME, оказываются на 3–6% ниже данных наземных DOAS-измерений и достаточно хорошо согласуются с рассмотренными озонозондовыми наблюдениями в “Ny-Alesund”.

Работа [27] посвящена сопоставлению данных измерений ОСО прибором GOME в период 7/95–12/95 с данными озонозондовых измерений (погрешность ОСО менее 5%) за 3 дня (11, 30/08 и 4/10/95) и измерений прибором Добсона за 19 дней (11/8–13/12/95, 153 измерения GOME). Для сопоставлений отбирались данные GOME в районе станции наземных наблюдений “Modena” (44.4° с.ш., 10.8° в.д.). В среднем GOME дает на 3.5% меньшие значения ОСО, чем наземные измерения.

В исследовании [28] данные GOME в период 22/7–13/12/95 сравниваются с наземными измерениями ОСО различными приборами – Добсона, Брюера, SAOZ, УФ-многоканальными фильтровыми приборами (GUV, NILUV), данными озонозондовых и лидарных измерений. Использовались данные наблюдений восьми станций, расположенных в области 59°–78° с.ш. и 9°–20° в.д., и станции “Punta-Arenas” (53.2° ю.ш., 70.9° з.д.). Наблюдаемые расхождения между измерениями ОСО прибором GOME и наземными наблюдениями

ями для разных станций составили от -17 Е.Д. для измерений в "Tromso" до $+6$ Е.Д. для измерений в "Punta-Arenas". В среднем значения ОСО по измерениям GOME оказываются на $3-12\%$ ($10-40$ Е.Д.) ниже наземных; рассогласования характеризуются сильной зависимостью от облачности и незначительной – от зенитного угла Солнца.

Работа [29] посвящена сопоставлению наземных измерений ОСО прибором Брюера на станции "De Bilt" (52.1° с.ш., 5.2° в.д.) с ближайшими измерениями GOME в период 23/7–30/10/95 (34 дня). Данные GOME дают в среднем на $4-5\%$ меньшие значения ОСО, чем наземные измерения.

В исследовании [30] данные GOME в период 18/9–7/12/95 (16 дней) сопоставлялись с данными измерений ОСО прибором Добсона на станции "Arrival Heights" (77.8° ю.ш., 166.6° в.д.). Расхождения между наземными и спутниковыми измерениями составляли от -23 до 54 Е.Д. и, очевидно, связаны с большими пространственно-временными вариациями ОСО в этом районе.

Исследование [31] посвящено сопоставлению наземных Dobson, SAOZ и DOAS-измерений на станции "Haute Provence" (43.9° с.ш., 5.7° в.д.) с данными GOME 26/8–17/9/95 (15 дней). Средние расхождения между значениями ОСО по наземным измерениям и измерениям GOME составили: GOME-DOAS(ВИД) – -2.4% , GOME-DOAS(УФ0) – -0.8% , GOME-SAOZ – -5.0% , GOME-Dobson – -6.3% .

Подводя итоги, можно констатировать, что анализ качества данных GOME об ОСО проводился во многих работах [17–31]. При этом привлекались данные наземных (спектрометры Добсона, Брюера, различные фотометры – GUV, NILUV, сумеречное зондирование – DOAS, SAOZ, и т.д.), озонозондовых и спутниковых (TOMS, TOSV) измерений. В большинстве работ данные GOME сопоставляются с таковыми наземных измерений ОСО, в основном в средних широтах Северного полушария. Основная часть сопоставлений попадает на период 7/95–12/95 (15–45 дня); в сопоставлении [19] используются данные двух месяцев (7–8/96) измерений на станции в Бремене; в работе [22] – данные в период с 28/6 по 15/12/96, а в [23] – с 28/6/96 по 30/4/97. Количество озонометрических станций в разных работах составляло от 1 до 16. Две работы посвящены глобальному сопоставлению данных GOME со спутниковыми измерениями ОСО. Результаты GOME сравнивались с данными прибора TOMS за год (8/96–8/97); сопоставлялись среднесезонные и среднемесячные значения ОСО и с данными прибора TOVS за 23 дня (8–9/95, 1/96). В большинстве работ обнаружено, что спектрометр GOME дает заниженные значения ОСО. Это занижение достигает в высоких широтах $8-12\%$. В работах [17, 21, 22, 28, 30], однако, отмечается противоположный эффект – завышение значений ОСО, по данным GOME, до 15% .

Таким образом, многочисленные исследования по валидации результатов измерений ОСО спутниковым прибором GOME дают противоречивую картину согласованности его данных с независимыми наблюдениями. Для однозначной оценки точности измерений GOME требуются постоянные сопоставления новых данных с результатами разнообразных независимых измерений во всем диапазоне условий спутникового эксперимента.

СОПОСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ GOME ОБ ОСО С ДАННЫМИ ИЗМЕРЕНИЙ РОССИЙСКОЙ ОЗОНОМЕТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

По результатам проведенных нами сопоставлений данных GOME об ОСО с результатами наблюдений на семи российских озонометрических станциях в июле и сентябре–октябре 1996 г. результаты измерений GOME дают в среднем на $6-12\%$ более низкие значения ОСО по сравнению с наземными [32–34]. Дополнительно, данные GOME об ОСО были сопоставлены с наземными измерениями на побережье Кандалакшского залива Белого моря (Карелия, пос. Чупа) летом 1997–1998 гг. [35]. Для измерений ОСО использовался озонометр M-124, калиброванный по спектрофотометру Добсона № 108 (ГГО, Санкт-Петербург). По результатам сопоставлений, в течение одной недели в июле 1997 г. данные GOME были в среднем на 9% ниже наземных измерений ОСО, а в июле–августе 1998 г. – на 5% .

Кроме того, мы сопоставили использованный нами массив измерений GOME в 1996 г. с данными наблюдений мировой озонометрической сети, оснащенной спектрофотометрами Добсона и Брюера. Результаты ежедневных глобальных спутниковых измерений ОСО сравнивались с данными наблюдений 54 станций, использующих измерения спектрометра Добсона и 22 станций, оснащенных спектрометром Брюера [36]. Эти приборы являются общепризнанными эталонами и традиционно используются для контроля качества спутниковых наблюдений. Период наблюдений, как и в предыдущем аналогичном исследовании [32–34], – июль и сентябрь–октябрь 1996 г.

Результаты попарных сопоставлений всех наземных (Dobson, Brewer) и спутниковых (GOME) измерений ОСО представлены на рис. 1. Ансамбль одновременных измерений ОСО состоял из 999 сопоставлений с данными наблюдений 54 добсоновских станций и 618 сопоставлений с данными наблюдений 22 станций, оснащенных прибором Брюера. Характеристики наблюдаемых рассогласований наземных и спутниковых измерений ОСО для рассмотренных ансамблей данных демонстрируют достаточно хорошее согласие используемых измерительных систем – среднее

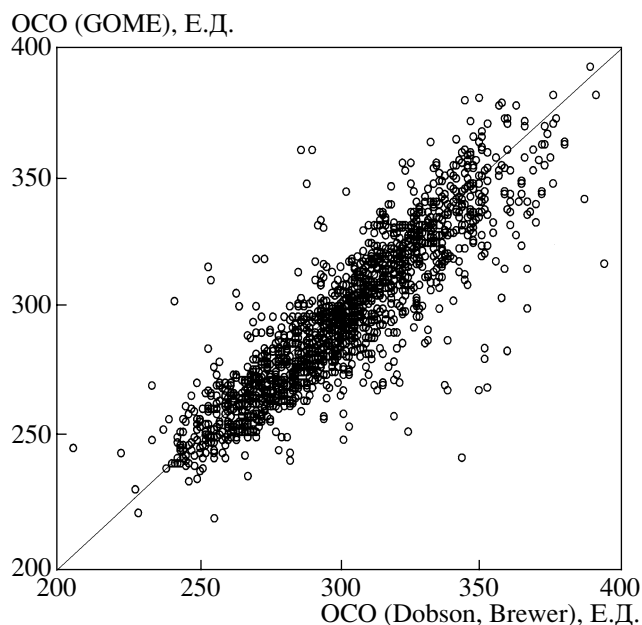


Рис. 1. Результаты сопоставлений данных измерений GOME с одновременными наблюдениями на 54 станциях Добсона и 22 станциях Брюера глобальной озонометрической сети в период 25.07–31.07.96 и 23.09–22.10.96 ($\Delta_{\text{GOME-Dobson, Brewer}} = -1.6\%$, $\sigma_{\text{GOME-Dobson, Brewer}} = 6.0\%$, $R = 0.89$).

рассогласование $\Delta_{\text{GOVE-Dobson, Brewer}}$ составляет -1.6% , среднеквадратичное $\sigma_{\text{GOME-Dobson, Brewer}}$ -6.0% ; коэффициент корреляции $R = 0.89$.

Таким образом, использование для валидации ансамбля данных GOME квазиглобальных наземных измерений подтверждает относительно высокое качество этих измерений ОСО. Одновременно полученные нами оценки указывают на некоторое занижение значений ОСО, измеренных GOME, по сравнению с наземной сетью (-1.6%). Эта величина заметно меньше ранее полученных нами при валидации данных измерений GOME для северо-западного и центрального регионов России (средние и среднеквадратичные расхождения между данными GOME и наземными измерениями озонометром М-124 составили тогда -8.8 и 10.1% соответственно) [32–34]. Следует отметить, что и в ряде других исследований, посвященный оценке точности измерений ОСО прибором GOME, различными авторами были получены относительно хорошие результаты – расхождения с данными независимых измерений для всего земного шара и для ряда наземных станций составили от 2 до 6% (см., например, [16]). В этой связи естественным объяснением результатов наших исследований может быть наличие высоких погрешностей в измерениях озонометра М-124. В связи с этим был проведен дополнительный независимый анализ качества измерений озонометра М-124 для используемого нами периода на-

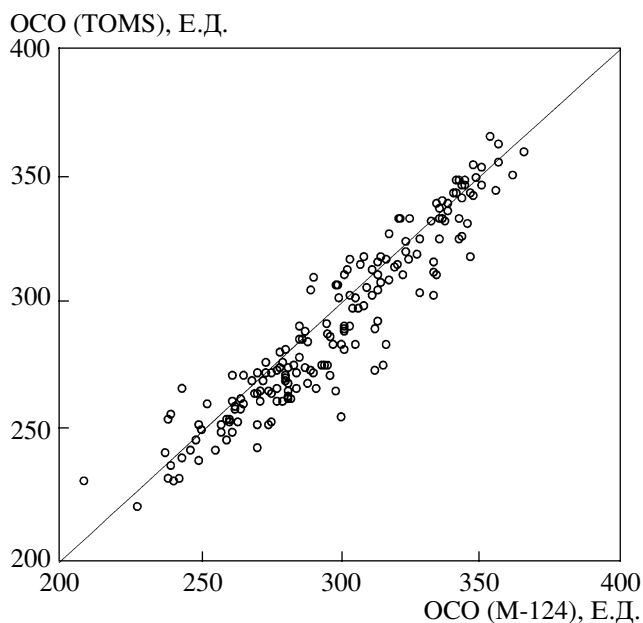


Рис. 2. Результаты попарных сопоставлений наземных (М-124) и спутниковых (TOMS) измерений общего содержания озона для семи станций наблюдений в исследуемые периоды 1996–1998 гг. ($\Delta_{\text{TOMS-M124}} = -1.8\%$, $\sigma_{\text{TOMS-M124}} = 4.2\%$, $R = 0.94$).

блюдений на основе их сопоставлений с измерениями спутникового прибора TOMS [37].

В данном сопоставлении результаты измерений ОСО приборами GOME (спутник) и М-124 (наземная сеть) сравнивались с данными карт глобального распределения ОСО по измерениям TOMS над соответствующими станциями [34]. На рис. 2 представлено сопоставление данных TOMS с данными измерений озонометра М-124, используемых для валидации измерений GOME в отдельные периоды 1996–1998 гг. Российские наземные измерения ОСО хорошо согласуются с данными TOMS – среднее рассогласование $\Delta_{\text{TOMS-M124}}$ составляет -1.8% , при среднеквадратичном $\sigma_{\text{TOMS-M124}} = 4.2\%$ и коэффициенте корреляции $R = 0.94$. Эти оценки говорят о достаточно высокой согласованности измерений озонометра М-124 с данными TOMS, тем самым подтверждая качество российских измерений и достоверность полученных ранее результатов по валидации данных GOME.

МЕЖДУНАРОДНАЯ ПРОГРАММА ДЕЛЬТА-ВАЛИДАЦИИ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ GOME (1999)

С момента своего первого выпуска летом 1995 г. система оперативной обработки данных GOME (GOME Data Processor – GDP) прошла через серию обновлений, результатом которых явилось некоторое повышение качества данных GOME [38].

Следует отметить, что последовательное развитие этой системы было в основном ориентировано на повышение качества данных GOME не об ОСО, а об общем содержании NO_2 , величина которого также восстанавливается по измерениям GOME в оперативном режиме. Различные усовершенствования и обновления системы GDP были связаны как с изменениями в алгоритме первичной обработки спектров уходящего излучения, так и с изменениями в методике их интерпретации для восстановления ОСО и NO_2 . В частности, были внесены поправки в коэффициенты абсолютной и спектральной калибровки измерений, обновлены используемые сечения поглощения NO_2 и модельный спектр комбинационного рассеяния (спектр Ринга), изменены некоторые параметры расчета воздушных масс. Тем не менее многочисленные исследования продемонстрировали необходимость снова пересмотреть некоторые составляющие методики обработки измерений, и весной 1999 г. была выпущена новая версия алгоритма интерпретации данных GOME–GDP 2.7 [39].

Так называемая “дельта-валидация” была проведена участниками группы по валидации данных GOME (GOME Validation Group) на основе ограниченного, но репрезентативного ансамбля измерений GOME в 1996 г. [40]. В работе группы участвовали научно-исследовательские организации нескольких стран Европы: Италии, Бельгии, Германии, Голландии и России. Исследования были организованы Европейским институтом космических исследований при Европейском космическом агентстве (ESRIN/ESA) и направлены на глобальную оценку качества новых данных GOME, обработанных по усовершенствованной версии алгоритма обработки (GDP 2.7).

Оценки точности данных GOME об ОСО проводились разными авторами на основе сопоставлений с результатами наземных наблюдений на станциях Системы мониторинга изменений в стратосфере (NDSC) [38]. Результаты анализа новых данных GOME (GDP 2.7) не выявили существенных изменений по сравнению с предыдущей версией обработки и подтвердили полученные ранее результаты – зависимость данных об ОСО от зенитного угла Солнца, широты и сезона измерений, а также от собственно величины ОСО.

Исследования, проведенные нами в рамках дельта-валидации, включали в себя анализ ансамбля данных GOME, ранее используемого при международной валидации данных GOME предыдущей версии обработки (GDP 2.4). Эти данные сопоставлялись с аналогичным ансамблем измерений GOME, обработанных по версии 2.7, а также с данными российских наземных озонметрических наблюдений. Рассматривался период измерений в течение всего 1996 г. на семи станциях:

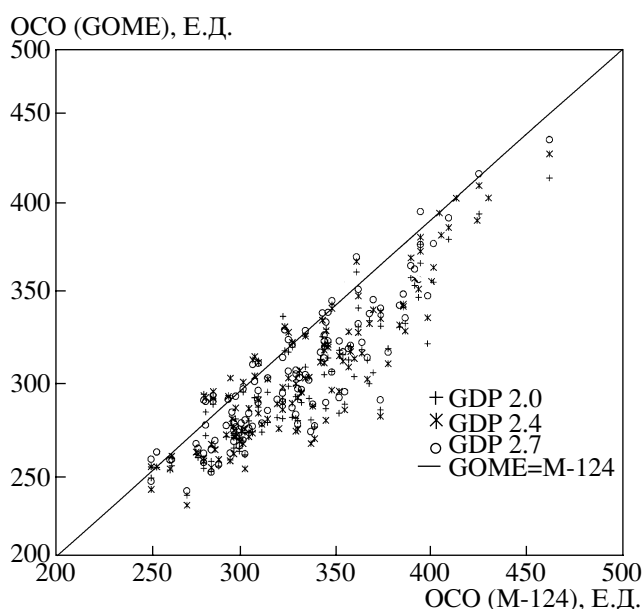


Рис. 3. Результаты попарных сопоставлений наземных (M-124) и спутниковых (GOME) измерений общего содержания озона для семи станций наблюдений за 1996 г. Данные GOME представлены тремя версиями оперативной обработки GDP 2.0, 2.4 и 2.7 ($\Delta_{\text{GDP2.0-M124}} = -8.0\%$, $\Delta_{\text{GDP2.4-M124}} = -7.0\%$, $\Delta_{\text{GDP2.7-M124}} = -5.9\%$).

Архангельск, Баренцбург, Екатеринбург, Москва, Мурманск, Печора и Санкт-Петербург.

Рассматриваемый ансамбль сопоставлений состоял из 110 спутниковых и наземных измерений среднесуточного ОСО, выполненных в период с 12 февраля по 13 декабря 1996 г. Результаты попарных сопоставлений всех наземных (M-124) и спутниковых (GOME) измерений ОСО для разных версий обработки данных измерений GOME (GDP 2.0, 2.4 и 2.7) представлены на рис. 3 (здесь же приведены и статистические характеристики наблюдаемых рассогласований). Как видно из рисунка, спутниковые данные об ОСО заметно ниже результатов наземных наблюдений для всех рассматриваемых версий оперативной обработки измерений GOME. Данные GOME, обработанные по новой версии (2.7), оказываются в среднем на 6% ниже наземных измерений, что, правда, несколько меньше аналогичных оценок для данных GOME версии GDP 2.0 ($\Delta_{\text{GOME-M12}} = -8\%$) и GDP 2.4 ($\Delta_{\text{GOME-M124}} = -7\%$).

НОВЫЕ СОПОСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ GOME ОБ ОСО С ДАННЫМИ ИЗМЕРЕНИЙ РОССИЙСКОЙ ОЗОНОМЕТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

В соответствии с результатами дельта-валидации [40], продемонстрировавшей некоторое повышение качества данных GOME новой версии

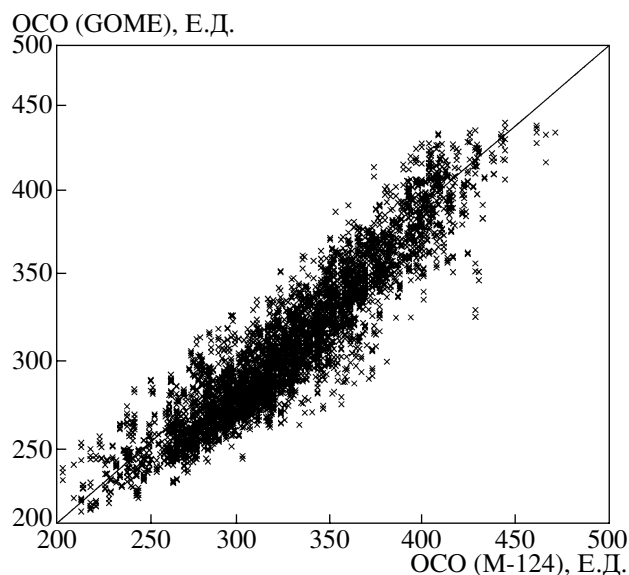


Рис. 4. Сопоставление оперативных данных GOME об общем содержании озона (ОСО, версия 2.7) с результатами одновременных измерений на 7 российских озонметрических станциях в 1996 г. (озонметр М-124: $\Delta_{\text{GOME-M124}} = -4.2\%$, $\sigma_{\text{GOME-M124}} = 7.1\%$, $R = 0.92$).

обработки (GDP 2.7), все измерения GOME были вновь переработаны ESA и распространены среди участников кампании по валидации. Результаты сопоставления данных GOME об общем содержании озона за 1996 г. (версия GDP 2.7) с одновременными измерениями на семи указанных выше российских озонметрических станциях представлены на рис. 4. Данные GOME версии 2.7 характеризуются более близким согласием с результатами наземных измерений – среднее расхождение $\Delta_{\text{GOME-M124}} = -4.2\%$, среднеквадратичное $\sigma_{\text{GOME-M124}} = 7.1\%$, коэффициент корреляции $R = 0.92$ (для данных GOME версии 2.0 Δ , σ и R составили -6.1% , 8.6 и 0.90 соответственно). Вместе с тем систематическое занижение величины ОСО в данных измерений GOME, ранее выявленное для отдельных пери-

одов измерений (лето–осень), наблюдается и при анализе данных за весь 1996 г. для обеих версий обработки (2.0 и 2.7).

Валидация данных GOME об общем содержании озона проводилась также в конце 1999 – начале 2000 г. в рамках международного проекта SOLVE (SAGE-III Ozone Loss Validation Experiment). Данные измерений GOME с ноября 1999 по март 2000 г. были сопоставлены с результатами наблюдений на станциях озонметрической сети России и стран СНГ, а также одновременными измерениями спутникового прибора TOMS (Earth Probe). В связи с недостаточной освещенностью большей части российской территории в зимнее время окончательный ансамбль сопоставлений состоял из 557 одновременных спутниковых (GOME и TOMS) и наземных измерений. Среднее отклонение $\Delta_{\text{GOME-M124}}$ данных GOME от наземных измерений составило -4.2% , при среднеквадратичном $\sigma_{\text{GOME-M124}} = 10.8\%$; при этом данные TOMS характеризуются хорошим согласием с результатами наземных измерений – $\Delta_{\text{TOMS-M124}} = -0.1\%$.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Исследования качества данных GOME об ОСО проводились многими авторами [17–31]. При этом использовались данные наземных (спектрометры Добсона, Брюера, различные типы фотометров, сумеречное зондирование и т.д.), озонзондовых и спутниковых (TOMS, TOVS) измерений. Анализ результатов многочисленных сопоставлений измерений ОСО с помощью спутникового прибора GOME с наземными измерениями различными приборами в 1995–1997 гг. показывает, что величины рассогласований находятся в широких пределах и зависят от многих факторов: региона и сезона наблюдений, величины зенитного угла Солнца и ОСО, методики интерпретации измерений и т.д. В большинстве работ обнаружено, что спектрометр GOME дает заниженные значения ОСО. Это занижение достигает в высо-

Таблица 2. Результаты сопоставления оперативных данных GOME с данными российской озонметрической сети в 1996–2000 гг.

Район измерений	Период сопоставлений	Версия данных GOME, №	Δ , %	σ , %
Северная и центрально-европейская часть России (42–82° с.ш., 4–70° в.д.)	01.07–31.07, 23.09–22.10.1996	2.0	–8.8	10.1
		2.0	–6.1	8.6
Карелия (66° с.ш., 34° в.д.)	01.01–31.12.1996 16.07–27.07.1997	2.7	–4.2	7.1
		2.0	–8.6	8.8
Россия и страны СНГ (38–76° с.ш., 24–170° в.д.)	15.07–15.08.1998 01.11.1999–15.03.2000	2.3	–5.3	6.0
		2.7	–4.2	10.8

ких широтах 8–12% [17, 20–22, 27, 30]. В работах [17, 21, 22, 28, 30], однако при определенных условиях отмечается и противоположный эффект – завышение значений ОСО по данным GOME (до 15%).

2. Результаты многочисленных сопоставлений оперативных данных GOME об ОСО с данными независимых наземных измерений российской озонометрической сети в 1996–2000 гг. выявили заметное систематическое занижение величины ОСО в данных GOME (4–9%; см. табл. 2). Достоверность приведенных выше результатов валидации данных GOME об ОСО и качество российских измерений подтверждены одновременными сопоставлениями наземных измерений с данными спутникового прибора TOMS (средние расхождения при этом составляют 0–2%).

3. Анализ данных GOME разных версий обработки (2.0, 2.4 и 2.7) демонстрирует постепенное уменьшение систематических расхождений между данными GOME об ОСО и результатами независимых измерений, связанное с совершенствованием оперативной методики интерпретации (алгоритм DOAS). Важнейшей задачей в дальнейшей работе по совершенствованию системы оперативной обработки данных GOME является определение основных источников погрешностей спутниковых измерений ОСО.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (код проекта 00-05-65224) и INTAS (код проекта INTAS-IESA-1511).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуцин Г.П. Исследования атмосферного озона. Л.: Гидрометеоиздат, 1963. 267 с.
2. Хргиан А.Х. Физика атмосферного озона. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 296 с.
3. Перов С.П., Хргиан А.Х. Современные проблемы атмосферного озона. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 287 с.
4. Кароль И.Л., Розанов В.В., Тимофеев Ю.М. Газовые примеси в атмосфере. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 192 с.
5. Кондратьев К.Я. Глобальная динамика озона // Итоги науки и техники. Геомагнетизм и вертикальные слои атмосферы. М.: ВИНИТ, 1989. Т. 19. 212 с.
6. Тимофеев Ю.М. Спутниковые методы исследования газового состава атмосферы (обзор) // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1989. Т. 25. № 5. С. 451–472.
7. Atmospheric ozone 1985. Assessment of our understanding of the processes controlling its present distribution and change // WMO. Rep. 1986. № 16. 817 p.
8. Report of the International Ozone Trends Panel: 1988 // WMO. Rep. 1990. № 18.
9. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1991 // WMO. Rep. 1992. № 25. 350 p.
10. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994 // WMO. Rep. 1995. № 37. 400 p.
11. Марчук Г.И., Кондратьев К.Я., Алоян А.Е., Вароцос К.А. Изменения общего содержания стратосферного и тропосферного озона: наблюдения и численное моделирование // Исслед. Земли из космоса. 1999. № 5. С. 12–30.
12. Burrows J.P., Chance K.V. SCIAMACHY and GOME: the scientific objectives // Proc. of SPIE. Opt. Methods in Atmosph. Chem. 1992. V. 1715. P. 502–512.
13. U. Platt. Differential optical absorption spectroscopy (DOAS) // Air Monitoring by Spectroscopic Techniques Chemical Analysis Series / Ed. Seegrism M. John Wiley and Sons, 1994. V. 127. P. 27–84.
14. Perner D., Klupfel T., Parchatka U. et al. Ground-based UV-VIS spectroscopy: Diurnal OCIO profiles during January 1990 above Sondre Stromfjord, Greenland // J. Geophys. Res. Lett. 1991. V. 18. P. 787–790.
15. Розанов В.В., Тимофеев Ю.М., Борроуз Дж. Информативность измерений уходящего УФ, видимого и ближнего инфракрасного солнечного излучения (аппаратура GOME) // Исслед. Земли из космоса. 1995. № 6. С. 29–39.
16. GOME Geophysical Validation Campaign, Final results Workshop Proceedings, ESA/ESRIN, Frascati, Italy, 24–26.01.1996 (ESA-WPP 108, 1996, 268 p.).
17. Eichmann K.-U. Частное сообщение. 1998.
18. Rathman W., Monks P.S., Llewellyn-Jones D. A preliminary comparison between TOVS and GOME level 2 ozone data // Proc. of the 3rd ERS Symp. on Space at the service of our Environment, Florence, Italy, March 1997, ESA-SP 414.
19. Burrows J.P., Buchwitz M., Eisinger M. et al. The Global Ozone Monitoring Experiment (GOME): Mission, Instrument Concept, and First Results (Ozone and NO₂) // Proc. of the 3rd ERS Symp. on Space at the service of our Environment, Florence, Italy, March 1997, ESA-SP 414.
20. Lambert J.-C., Van Roozendaal M., Peeters P. et al. GOME ozone total amounts validation by groundbased observations performed at NDSC/Alpine stations, in GOME Geophysical Validation Campaign, ESA-WPP-108, ESA/ESTEC, Noordwijk, the Netherlands, 1996. P. 115–122.
21. Lambert J.-C., Van Roozendaal M., Simon P.C. et al. GOME products validation with the SAOZ network, in GOME Geophysical Validation Campaign, ESA-WPP-108, ESA/ESTEC, Noordwijk, the Netherlands, 1996. P. 123–131.
22. Lambert J.-C., Van Roozendaal M., Muller J.-F. et al. Pole-to-pole validation of the ERS-2 GOME level 2 products with the SAOZ ground-based network // Proc. of the 3rd ERS Symp. on Space at the service of our Environment, Florence, Italy, March 1997, ESA-SP 414. P. 629–636.
23. Lambert J.-C., Van Roozendaal M., Muller J.-F. et al. Investigation of pole-to-pole performances of spaceborne atmospheric chemistry sensors with the NDSC // J. Atmos. Sci. V. 56. P. 176–193.
24. Schoubs E., De Muer D. Validation of ERS-2 GOME ozone data by ground-based observations at Uccle (Belgium), in GOME Geophysical Validation Campaign,

- ESA-MPP-108. Noordwijk, the Netherlands: ESA/ESTEC, 1996. P. 133–139.
25. *Stahelin J., Renaud A.* Preliminary validation of GOME ozone measurements by comparison with total ozone data from Arosa (Switzerland), in GOME Geophysical Validation Campaign, ESA-WPP-108, Noordwijk, the Netherlands: ESA/ESTEC, 1996. P. 141–147.
 26. *Ladstatter-Weibenmayer A., Burrows J.P., Richter A. et al.* Validation of GOME O₃ and NO₂ measurements in Bremen, Ny-Alesund and Neumayer, in GOME Geophysical Validation Campaign, ESA-WPP-108, Noordwijk, the Netherlands: ESA/ESTEC, 1996. P. 153–160.
 27. *Santangelo R., Pugnaghi S., Teggi S. et al.* Ozone concentration over northern Italy (Modena area) by means of Dobson measurements and ozone-soundings comparison with GOME observations, in GOME Geophysical Validation Campaign, ESA-WPP-108, Noordwijk, the Netherlands: ESA/ESTEC, 1996. P. 185–188.
 28. *Hansen G., Dahlback A.* Validation of total ozone measurements with GOME during the main validation phase: the Norwegian project, in GOME Geophysical Validation Campaign, ESA-WPP-108, Noordwijk, the Netherlands: ESA/ESTEC, 1996. P. 199–208.
 29. *Piters A.J.M., Levelt P.F., Kuik F. et al.* Ground-based measurements at KNMI used for GOME validation, in GOME Geophysical Validation Campaign, ESA-WPP-108, Noordwijk, the Netherlands: ESA/ESTEC, 1996. P. 215–218.
 30. *Bodeker G.E., Matthews W.A., Kreher K., Nichol S.E.* Co-ordinated ground-based observations at Arrival Heights, Antarctica, during GOME validation, in GOME Geophysical Validation Campaign, ESA-WPP-108, Noordwijk, the Netherlands: ESA/ESTEC, 1996. P. 251–254.
 31. *Turk A., Callies J., Lefebvre A. et al.* Observations of O₃ and NO₂ with the GOME BBM during in-orbit validation of the ERS-2 GOME, in GOME Geophysical Validation Campaign, ESA-WPP-108, Noordwijk, the Netherlands: ESA/ESTEC, 1996. P. 255–264.
 32. *Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М., Ионов В.В., Шаламянский А.М.* Сравнение измерений общего содержания озона аппаратурой GOME (спутник ERS-2) с данными озонметрической сети для Северо-Запада России // Вестн. СПбГУ. 1998. Сер. 4. Вып. 3 (№ 18). С. 108–111.
 33. *Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М., Ионов В.В. и др.* Сопоставление измерений общего содержания озона спектрометром GOME (ERS-2) с данными российской озонметрической сети // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 4. С. 14–22.
 34. *Ionov D.V., Timofeev Yu.M., Ionov V.V. et al.* Comparison of total ozone measurements by GOME spectrometer (ERS-2) with data of Russian ozonometric network // Proc. of the Conf. on Information for Sustainability, 27th International Symp. of Remote Sensing of Environment, Tromso, Norway, 8–12 June, 1998. P. 274–277.
 35. *Ionov D.V., Timofeev Yu.M., Ionov V.V. et al.* Validation of the GOME total ozone measurements (ERS-2) by data of Russian ozonometric network // European Symposium on Atmospheric Measurements from Space, 18–22 January 1999, Noordwijk, The Netherlands: ESTEC, 1999.
 36. *Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М., Ионов В.В. и др.* Валидация измерений общего содержания озона (аппаратура GOME) с помощью российской наземной озонметрической сети // Матер. конф.: Международный Симпозиум стран СНГ “Атмосферная Радиация”, 12–15 июля 1999, Санкт-Петербург. С. 118.
 37. *McPeters R.D., Bhartia P.K., Krueger A.J. et al.* Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User’s Guide // NASA Reference Publication 1384, April, 1996.
 38. GOME Data Improvement Validation Report / Ed. Greco B. ESA/ESRIN APP/AEF/17/GB, 1998. 58 p.
 39. Update Report of GDP 0-to-1 Version 2.0 and GDP 1-to-2 Version 2.7, ER-TN-DLR-GO-0043 (issue 1, 30.07.1999).
 40. ERS-2 GOME Data Products Delta Characterisation Report 1999 / Ed. Lambert J.-C., Skarlas P., ESA/ESRIN, issue 0.1, November 1999. 97 p.

COMPARISONS OF SATELLITE (APPARATUS GOME, TOMS) AND GROUND-BASED TOTAL OZONE MEASUREMENTS

D. V. Ionov, Yu. M. Timofeev, A. M. Shalamyansky

Scientific-Research Institute of Physics, St. Petersburg State University

The paper presents an overview of results from international experiments for the validation of GOME TO measurements, that demonstrate inconsistent conclusions. The data of new comparisons between GOME measurements and independent observations by different ground-based instruments – Dobson, Brewer spectrophotometers and ozonometer M-124, are given. An outcome from numerous comparisons of GOME operational TO data with independent ground-based measurements at Russian ozonometric network in 1996–2000 reveal a systematic underestimation in GOME data (4–9%), that is also seen in comparison with simultaneous TOMS measurements. It is mentioned, that these systematic deviations are decreasing with a new versions of GOME data processing (versions 2.4, 2.7).