

## ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 535.34:539.1

М.А. Бондаренко, О.Е. Баженов, М.В. Гришаев

### Результаты сравнения данных космической аппаратуры TOMS и наземной озонметрии

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 23.12.2005 г.

Представлены результаты сравнения наземных измерений и спутниковых данных общего содержания озона. Выделяются основные источники ошибок, влияющих на точность измерений спутниковой аппаратуры. Показано, что данные TOMS являются репрезентативными и отражают значения ОСО в пределах своего заявленного уровня погрешности. Выделены регионы, для которых характерны повышенные отклонения спутниковых данных от наземных измерений.

В настоящее время все более широкое применение находят методы, основанные на ретроспективной реконструкции климатологических параметров, в частности значений общего содержания озона. Разработанные методики представлены в работах [1–4]. Реконструированные значения ОСО могут охватывать временной период длительностью до 1 тыс. лет и представляют немалый интерес при исследованиях глобального поведения ОСО. В методике [1–4] используют данные о плотности древесных годовичных колец, а также уже имеющиеся данные ОСО (охватывающие сравнительно небольшой промежуток времени в 25–50 лет).

Наиболее полную картину по ОСО отражают спутниковые данные TOMS. Географический диапазон сканирования TOMS охватывает практически всю поверхность земного шара, демонстрируя динамику ОСО за последние 25 лет. Таким образом, TOMS является важнейшим источником данных, который активно используется при проведении ретроспективных реконструкций ОСО.

В данной статье представлены результаты сравнения наземных измерений и спутниковых данных. Выделены следующие источники ошибок, влияющих на точность измерений спутниковой аппаратуры:

- повышенная облачность;
- вспышки солнечной активности;
- изменения отражающей способности земной поверхности, связанные с образованием снежного покрова и другими причинами.

Каждая ошибка от источников может проявляться одним или несколькими способами:

- как случайная ошибка,
- как не зависящая от времени абсолютная ошибка,
- в виде тренда.

В качестве данных наземных измерений послужили среднемесячные данные, взятые из Интернет-ресурса [www.woudc.org](http://www.woudc.org) и полученные с помощью спектрофотометра Добсона, который в силу

своей точности рассматривается как эталонный источник данных. Сравнение проводилось по 27 годам, находящимся во всевозможных точках земного шара. В табл. 1 приведены средние расхождения наземных и спутниковых данных за период с 1996 по 2005 г.

Полученные результаты демонстрируют зависимость между широтой сканирования спутникового оборудования и степенью расхождения измерений TOMS с данными наземных измерений. На рис. 1 представлена такая зависимость.

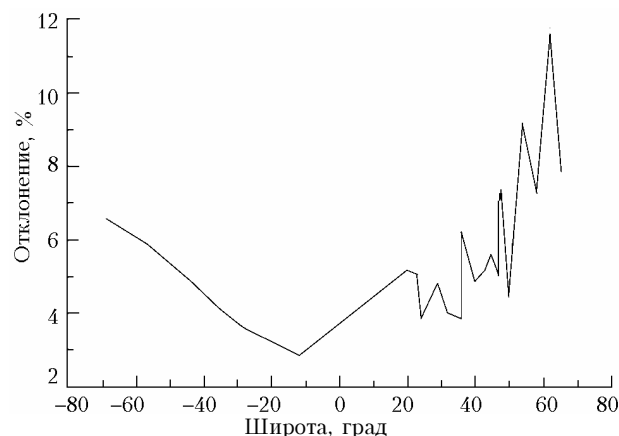


Рис. 1. Зависимость среднего расхождения спутниковых и наземных данных от широты

Для того чтобы разобраться в причинах происходящего, следует более подробно рассмотреть специфику северных регионов, для которых характерно обилие снега в зимние периоды. Это может повлиять на точность измерений спутниковой аппаратуры, поскольку снежный покров меняет отражающую способность земной поверхности на весьма длительный период. Влияние облаков на среднюю ошибку измерений менее существенно, поскольку носит относительно непродолжительный характер, и в среднемесячных данных ОСО такое влияние

Таблица 1

## Расхождения аппаратуры TOMS с наземными станциями

Наземная станция	Отклонение, е.Д.		Дата макс. отклонения	Широта, град	Долгота, град	Всего точек	Отклонение, %
	среднее	максим.					
Якутск, Россия	11,5973	63	сент. 01	62	129	72	3,1
Эдмонтон, Англия	9,1792	43	июнь 98	54	-113	101	2,9
Фэрбэнкс, США	7,88225	32	апр. 03	65	-147	66	2,2
Хоэнпайсенберг, Германия	7,34504	45	дек. 96	48	11	103	2,4
Гус-Бэй, Канада	7,34057	33	февр. 04	53	-60	99	2,3
Черчилл, Канада	7,27524	50	январ. 00	58	-94	92	2,3
Бисмарк, США	6,93255	46	июнь 01	47	-101	102	2,1
Сёва, Япония	6,60316	28	январ. 99	-69	39	78	2,4
Нэшвилл, США	6,22551	46	апр. 01	36	-87	99	2
Остров Маккери, Австралия	5,78438	31	авг. 02	-55	159	99	2
Уккль, Бельгия	5,76122	27	январ. 04	51	4	101	1,7
Галифакс, Канада	5,61383	26	март 01	45	-63	63	1,6
Саппоро, Япония	5,18561	22	март 98	43	141	103	1,5
Мауна-Лоа, США	5,16918	25	сент. 02	20	-156	101	2
Таманрассет, Алжир	5,05673	25	январ. 01	23	6	61	1,8
Ароза, Швейцария	5,04341	24	февр. 99	47	10	103	1,6
Болдер, США	4,87563	21	дек. 97	40	-105	103	1,5
Кэмборн, Англия	4,8697	23	дек. 03	50	-5	87	1,4
Новый Дели, Индия	4,82693	22	дек. 97	29	78	103	1,7
Мурманск, Россия	4,50039	19	март 00	69	33	48	1,4
Градец-Кралове, Чехия	4,45572	31	февр. 99	50	16	103	1,3
Буэнос-Айрес, Аргентина	4,01523	17	январ. 02	-34	-58	99	1,4
Кагосима, Япония	3,98873	18	дек. 96	32	130	103	1,4
Татено, Япония	3,87296	17	май 97	36	140	103	1,2
Минамиторисима, Япония	3,84775	17	авг. 99	24	154	96	1,4
Брисбен, Австралия	3,52439	17	окт. 01	-27	153	100	1,2
Дарвин, Австралия	2,86323	12	март 00	-12	131	99	1,1

Таблица 2

## Расхождения аппаратуры TOMS с наземными станциями в теплые и холодные полугодия

Станция	Среднее отклонение, е.Д.		Широта, град
	холодное полугодие	теплое полугодие	
Фэрбэнкс, США	8,9175	6,91973	65
Якутск, Россия	12,94244	10,32613	62
Эдмонтон, Англия	9,53732	8,80297	54
Гус-Бэй, Канада	8,7412	4,52027	53
Уккль, Бельгия	6,21073	5,14377	51
Градец-Кралове, Чехия	5,12634	3,63408	50
Кэмборн, Англия	6,0088	3,38438	50
Хоэнпайсенберг, Германия	9,43263	3,51881	48
Бисмарк, США	6,48102	7,30978	47
Ароза, Швейцария	5,41346	4,54618	47
Галифакс, Канада	6,67438	4,37023	45
Саппоро, Япония	5,7699	3,45165	43
Болдер, США	5,06933	3,71873	40
Нэшвилл, США	5,28259	7,11572	36
Татено, Япония	4,09689	2,87487	36
Кагосима, Япония	4,21355	3,64221	32
Новый Дели, Индия	4,89653	4,65657	29
Минамиторисима, Япония	3,01386	4,44516	24
Таманрассет, Алжир	5,76045	4,30653	23
Мауна-Лоа, США	5,44893	4,39474	20
Дарвин, Австралия	3,2376	2,45053	-12
Брисбен, Австралия	3,49933	3,54562	-27
Буэнос-Айрес, Аргентина	4,40605	3,62531	-34
Остров Маккери, Австралия	4,63809	6,78578	-55
Сёва, Япония	6,60722	5,52328	-69

не должно остро проявляться. По той же причине можно пренебречь влиянием всплесков солнечной активности на точность среднемесячных показателей ОСО. Также следует учитывать тот факт, что подобная вспышка должна одинаково влиять на уровень расхождений для всего диапазона географических координат. Для каждой наземной станции были рассмотрены максимумы расхождений с измерениями TOMS, а также даты, на которые эти расхождения приходятся. Эти результаты, представленные в табл. 1, демонстрируют случайность даты максимумов для каждой станции, и, таким образом, позволяют судить о том, что всплески солнечной активности не влияют существенным образом на достоверность среднемесячных данных TOMS.

Для того чтобы окончательно убедиться во влиянии фактора снежного покрова, были проведены дополнительные сравнения для теплых (апрель–сентябрь) и холодных (октябрь–март) периодов. На основе результатов, представленных в табл. 2, можно разбить исследуемые наземные точки на 3 категории.

– Станции, расположенные в экваториальной зоне. Для данных географических точек характерна высокая степень согласия данных TOMS с наземными данными.

– Станции, расположенные в средних широтах. Для данных географических точек характерна высокая степень согласия измерений TOMS с наземными станциями в теплое полугодие. Тем не менее в холодное полугодие для таких точек характерны более высокие расхождения спутниковых и наземных измерений, не выбивающихся, однако, из заявленной погрешности TOMS (3%).

– Станции, расположенные в высоких широтах. Для данных точек характерно обилие снежного покрова как в теплые, так и в холодные полугодия. Поэтому средние погрешности спутникового оборудования остаются более высокими в течение всего года. В ошибках для северных широт практически всегда наблюдается отрицательный тренд (рис. 2).



Рис. 2. Тренд отклонения для точки Хоэнпайсенберг, Германия

Убедившись в достоверности данных TOMS (по крайней мере для широт умеренного пояса) после их сопоставления с данными спектрофотометра Добсона, мы провели сопоставление данных

озонметра M-124 Сибирской лидарной станции с данными TOMS. Период работы озонметра на Сибирской лидарной станции охватывает годы с 1993 по 2005 г. Валидация проводилась за период с 2003 по 2004 г.

Озонметр при угловой высоте Солнца более  $10^\circ$  измеряет (в относительных единицах) поток интегрального ультрафиолетового излучения диска Солнца или участка неба в зените в трех диапазонах спектра, выделяемых тремя светофильтрами. В дальнейшем производится пересчет значений, регистрируемых в первых двух диапазонах, в значения общего содержания озона в атмосфере. Предел допустимого значения относительной погрешности определения ОСО озонметром M-124 не превышает 7% при измерениях по Солнцу.

Из сравнения рис. 3,а и 3,б видно, что качественный ход кривых совпадает.

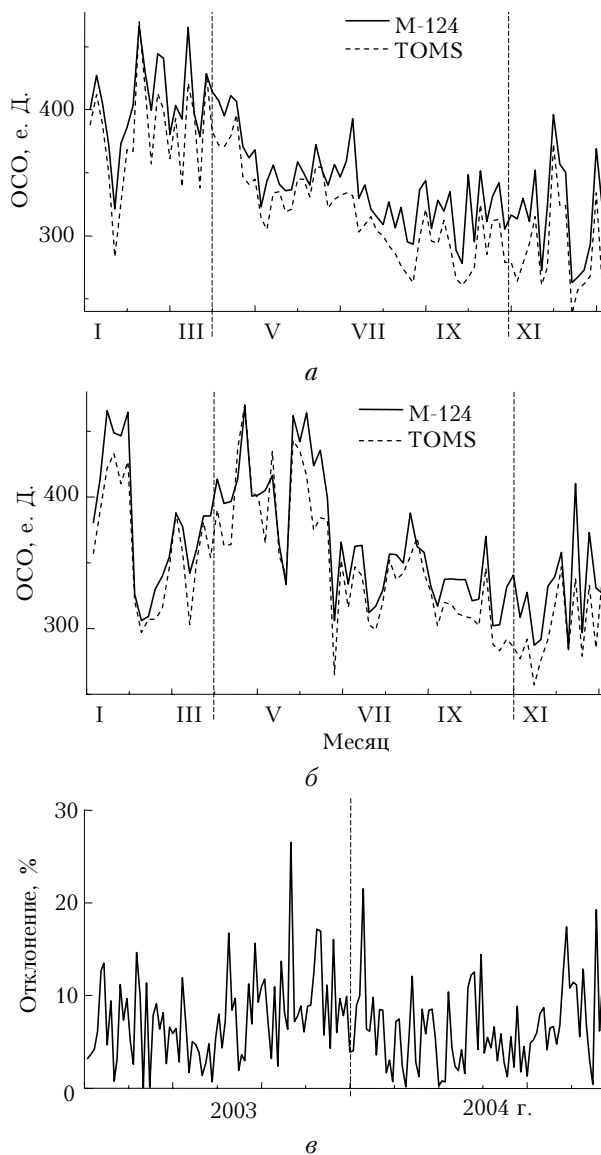


Рис. 3. Сравнение данных TOMS и M-124 для 2003 (а), 2004 гг. (б) и относительная разница между ними для 2003–2004 гг. (в)

Однако количественное совпадение достаточно редко. Кривая для данных TOMS, как правило, идет ниже кривой для М-124. Наибольшее качественное согласие наблюдается в первой половине года на годичном интервале и в 2004 г. — на двухгодичном. Первое, по-видимому, объясняется более высоким уровнем ошибок в осенне-зимний период (нет измерений по Солнцу, в основном облачные дни с низкой облачностью, короткий световой день, низкие значения ОСО). Качественное совпадение подтверждается высокой корреляцией этих двух наборов данных (0,95 для 2003 г. и 0,94 для 2004 г.).

Также был проведен количественный анализ расхождений между данными TOMS и М-124 для конкретных дней. Разница данных для 14 февраля 2003 г. составила 38,4 е.Д. и была вызвана присутствием дымки в день измерений. Расхождение для 21 февраля 2003 г. составило 36,2 е.Д. и, по-видимому, было вызвано слишком быстрым прогревом прибора на 20°. Разница в 44,5 е.Д. 23 марта 2003 г. является следствием низкой сплошной облачности и малого количества измерений за день. Ошибка в 49,5 е.Д. 15 ноября 2003 г. вызвана низкой облачностью. Разница 24 апреля 2004 г., равная 47,8 е.Д., обусловлена высокими значениями ошибок в вечернее время из-за начинавшегося выпадения измороси. Расхождение в 54,5 е.Д. 12 октября 2004 г. объясняется низкой сплошной облачностью. Абсолютная средняя разность для периода двух лет составила 23,94 е.Д., а относительная средняя разность — 7,1%. Отдельно для теплого и холодного сезонов относительная разность составила соответственно 6,6 и 7,3% в 2003 г. и 6,6 и 5,9% в 2004 г.

Из рис. 3 следует, что необходимы более тщательный анализ и выбраковка измерений за день для получения среднесуточного значения. Безусловно, важными требованиями являются репрезентативность данных и учет условий наблюдения за день. По-видимому, более высокая точность измерений могла бы быть достигнута после очередной калибровки прибора.

Помимо валидации, с 19 по 25 июля в рамках экспедиции «Озон-2005» проводились измерения ОСО по маршруту Томск—Мошково—Подойниково—Завьялово—Барнаул—Томск. Анализ полученных данных ОСО (рис. 4) показал, что значения ОСО, измеренные озонометром М-124 наземного базирования, в пределах допустимых погрешностей совпадают со значениями ОСО, полученными космическим аппаратом TOMS. С помощью метода линейной регрессии была произведена оценка изменения ОСО в зависимости от широты. Полу-

ченное значение отрицательного тренда составляет  $-(2,7 \pm 0,5)$  е.Д. на градус широты, что согласуется с широтным распределением ОСО в летнее время.

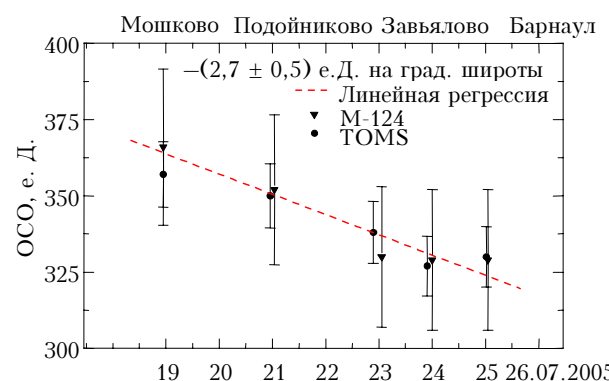


Рис. 4. Широтное и временное изменения ОСО по данным спутниковых (TOMS) и наземных (М-124) наблюдений

Результаты проделанной работы можно сформулировать следующим образом:

— Данные TOMS являются репрезентативными и отражают данные ОСО в пределах своего заявленного уровня погрешности.

— Для повышения точности этих измерений следует учитывать ошибку в высоких широтах, которая проявляется в виде отрицательного тренда.

— Результаты экспедиционных измерений ОСО озонометром М-124, как и анализ данных измерений на Сибирской лидарной станции, показали хорошее соответствие с данными спутниковых наблюдений TOMS, что делает возможным использование этого прибора в дальнейших исследованиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке по грантам РФФИ № 03-05-65105, 05-05-98003.

1. Зуев В.В., Бондаренко С.Л. Взаимосвязь долгопериодной изменчивости озонового слоя атмосферы с обусловленной УФ-Б воздействием изменчивостью плотности древесины // Оптика атмосфер. и океана. 2001. Т. 14. № 12. С. 1–4.
2. Зуев В.В., Бондаренко С.Л. Реконструкция палеоповедения озонового слоя из дендрохронологических данных с использованием спутниковых данных TOMS // Исслед. Земли из космоса. 2002. Т. 6. С. 19–24.
3. Зуев В.В., Бондаренко С.Л. Реконструкция многовекового хода общего содержания озона на основе дендрохронологических данных // Докл. РАН. 2003. Т. 392. № 5. С. 682–685.
4. Zuev V.V. Reconstruction and prediction of long-period variations of ozonosphere using ozonometric and dendrochronological data // Int. J. Remote Sens. 2005. V. 26. N 16. P. 3631–3639.

*M.A. Bondarenko, O.E. Bazhenov, M.V. Grishaev. Comparison of TOMS data and ground ozone measurements.*

Results of comparison of ground and space measurements of the total ozone concentration are presented. Principal sources of errors affecting the measurement accuracy of the space-borne instruments are pointed. It is shown that the TOMS data are representative and reflect TOC values within their standard error level. Some regions are distinguished with increased deviations of space data from the ground ones.