

# Глобальное распределение основных спектральных гармоник ОСО по данным спутниковых измерений (TOMS)

К.Н. Вишератин<sup>1</sup>, М.М. Троянов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт экспериментальной метеорологии НПО "Тайфун",  
249020 г. Обнинск, пр. Ленина, 82  
E-mail: kvisher@typhoon.obninsk.ru*

<sup>2</sup>*Государственный технический университет атомной энергетики,  
249030 г. Обнинск, Студгородок, 1*

На основе среднемесячных значений общего содержания озона (ОСО) по данным TOMS (версия 7) за 1979 - 2003 гг. были построены карты глобального распределения средних значений, спектральных амплитуд годовой гармоники (12 мес.), квазидвухлетних колебаний (20-35 мес.) и длиннопериодных колебаний (более 80 мес.). Расчет спектральных характеристик проводился с помощью модифицированного Фурье-преобразования для каждого узла данных TOMS с разрешением 1° по широте и 1,25° по долготе, т.е. для 103680 временных рядов. Для средних значений ОСО заметны топографические эффекты. Минимум годовой гармоники сдвинут относительно экватора на юг на 4,5°. Наименьшие амплитуды этой гармоники наблюдаются в области 110°E -160°E. Основная особенность глобального распределения квазидвухлетних колебаний – четкий и узкий максимум колебаний с периодами от 27 до 35 мес. над экватором и симметричные минимумы на широтах 10°-12°N и 10°-12°S. Распределение квазидесятилетних гармоник имеет более сложную меридионально - широтную структуру.

## Введение

Данные об общем содержании озона, полученные с помощью спутниковой аппаратуры TOMS (NASA/Goddard Space Flight Center's Database; <http://toms.gsfc.nasa.gov>), охватывают (с небольшим перерывом) период времени с ноября 1978 года по настоящее время. Значительные усилия по доработке алгоритмов обработки спутниковых данных и сверка получаемых значений ОСО с данными наземных озонметров привели к тому, что де-факто спутниковые данные TOMS стали эталоном [1]. Это позволяет поставить задачу анализа статистических характеристик и спектрального состава вариаций ОСО и его временной изменчивости с максимальным пространственным разрешением порядка 50-100 км.

## Данные и метод

Использовались среднемесячные данные TOMS за 1979-2003 гг. с пространственным разрешением – 1,25° по долготе и 1° по широте. Спектральный анализ проводился с использованием модифицированного классического Фурье-преобразования [2]. Этот метод (SCFT) имеет существенно большую точность в определении параметров колебаний в сравнении с обычно используемым методом быстрого Фурье преобразования (FFT) и дополнительное важное преимущество, связанное с возможностью анализа рядов со случайно расположенными пропусками. В качестве примера на рис. 1 показаны результаты вычислительных экспериментов для ряда, состоящего из одной гармоники с периодом 50 отсчетов (дней) и амплитудой, равной 1. Начальная длина ряда равнялась 25 дням, т.е. полупериоду гармоники. Постепенно длина ряда увеличивалась на один день, вплоть до 1600 дней и для каждого из полученных таким образом рядов был проведен спектральный анализ. Из рисунка видно, что FFT дает правильные результаты для амплитуд только в случае, когда период гармоники укладывается на длине ряда в целое число раз. В остальных случаях независимо от длины ряда вычисленные значения амплитуды могут существенно отличаться. Точность определения частоты (периода) растет с длиной ряда и при длине ряда, превышающей 10 периодов гармоники, достигает 2%. Классическое преобразование Фурье (не показано на рисунке) дает существенно меньшие погрешности определения амплитуды и частоты. При длине ряда, равной 2 периодам гармоники, ошибки в определении амплитуды не превышают 5%, а частоты 4%.

Расчеты по алгоритму SCFT дают наилучшие результаты. В частности, при длине ряда, большей, чем 5-6 периодов, период гармоник определяется с точностью, лучшей 0.1%. Заметим, однако, что машинное время, требуемое для расчетов по методике SCFT, на порядки превышает время, требуемое при использовании метода FFT.

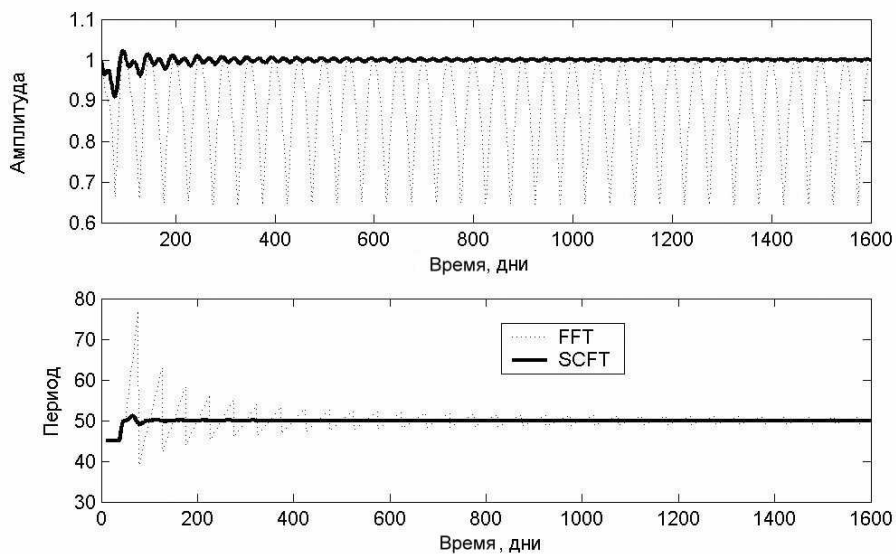


Рис. 1. Сопоставление результатов определения методами FFT и SCFT амплитуды и периода гармоник с периодом 50 дней и амплитудой, равной 1 при увеличении длины ряда от 25 до 1600 дней

### Средние значения ОСО

Спектральный анализ вариаций ОСО для всех узлов сетки данных ТОМС видимо впервые был проведен в [3-5]. Карты глобального распределения средних значений, тренда и амплитуд некоторых гармоник ОСО, построенные в [3-5] показывают, что пространственное распределение этих характеристик поля ОСО имеет неоднородную, пятнистую, иногда волновую структуру. Пространственное распределение средних за период 1979-2003 гг. значений ОСО показано на рис. 2. Как это ранее отмечалось во многих работах, усредненное за период наблюдений содержание озона имеет минимум над экватором. В пространственном распределении средних значений отчетливо проявляются береговые линии не только западного побережья Южной Америки [6, 7], но и других материков и даже отдельных островов. На основе спутниковых данных NCEP/NCAR (NCEP/NCAR Reanalysis-2 Project; <http://wesley.wvb.noaa.gov>) о полях ветра на высотах от 20 до 200 гПа, локальный минимум в общем содержании озона над западным побережьем Южной Америки был связан в [7] с вертикальными составляющими циркуляционных ячеек. Следует, однако, отметить, что существует определенный скепсис по поводу достоверности данных NCEP/NCAR. Данные NCEP (поля зонального ветра на высотах до 10 гПа) по мнению авторов [8, 9] дают нереалистичную картину циркуляции в тропической зоне, в частности вблизи Анд и над тропической Африкой, что возможно связано с неточностями в алгоритмах определения температуры. Эти неточности (при тесной корреляционной связи вариаций температуры на высотах вблизи тропопаузы и ОСО) могут быть в принципе и причиной указанных топографических эффектов в пространственном распределении ОСО. Однако напомним, что предварительный вывод о наличии систематических различий в содержании ОСО над океаном, прибрежными линиями и островами был сделан Г.П. Гуциным [10] еще до начала систематических спутниковых измерений, по результатам сопоставления немногочисленных измерений ОСО на кораблях, островных и прибрежных озонных станциях.

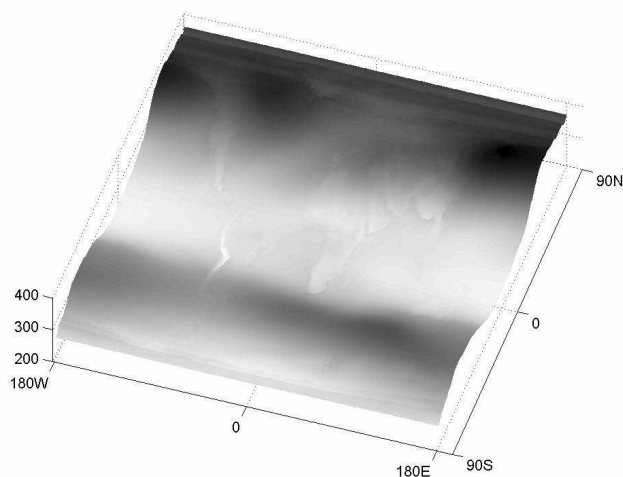
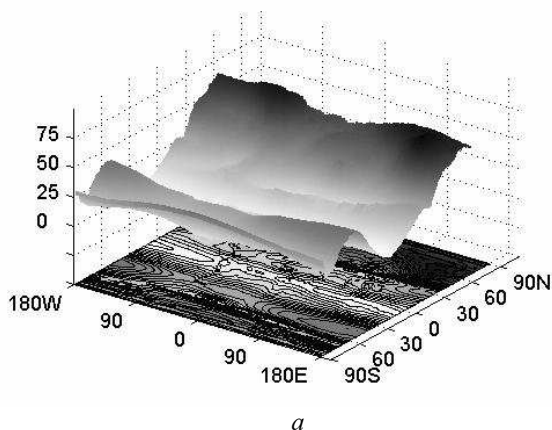


Рис. 2. Распределение средних значений ОСО за период 1979-2003 гг. Вертикальная шкала в ЕД

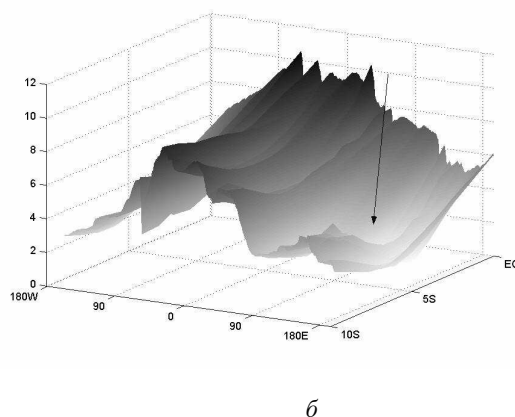
### Годовая гармоника ОСО

Карты пространственного распределения амплитуды годовой гармоники для земного шара и приэкваториальной области показаны на рис 3а, б. В целом для земного шара минимум этой гармоники смещен на юг на 4-5 градусов. Как следует из рис. 3.б, амплитуда годовой гармоники меняется в приэкваториальной области от 10-12 ЕД над Южной Америкой до значений, близких к нулю, к востоку от Новой Гвинеи (над морем Бисмарка, 150-155°Е). Таким образом, абсолютный минимум годовой гармоники озона совпадает с областью усиленной конвективной активности [11]. Над береговыми линиями континентальных материков (Африки и Южной Америки) заметны отчетливые минимумы. Эти минимумы возможно связано с существованием локальных циркуляционных ячеек, в которых над береговой линией континента восходящие потоки воздуха приводят к понижению концентрации ОСО.

Анализ спектрального состава колебаний вблизи периода 12 мес. показал, что в области, где амплитуда АО минимальна, продолжают существовать колебания на частотах 10.7-10.8, 11.25-11.3, 12.7-12.8 и 13.4-13.5 мес. (рис. 4). Разность частот между этими колебаниями составляет примерно  $0.0045 \text{ мес}^{-1}$ , и механизм возникновения таких колебаний возможно обусловлен биениями годовой гармоники с длиннопериодным колебанием (близким к периоду обращения лунных узлов, равному 18.6 лет).



а



б

Рис. 3а. Распределение амплитуды годовой гармоники. Вертикальная шкала в ЕД.

Рис. 3б. Распределение амплитуды годовой гармоники для экваториальной области  $0^{\circ}$  -  $10^{\circ}$  ю.ш. Стрелкой показано положение абсолютного минимума амплитуды годовой гармоники. Вертикальная шкала в ЕД

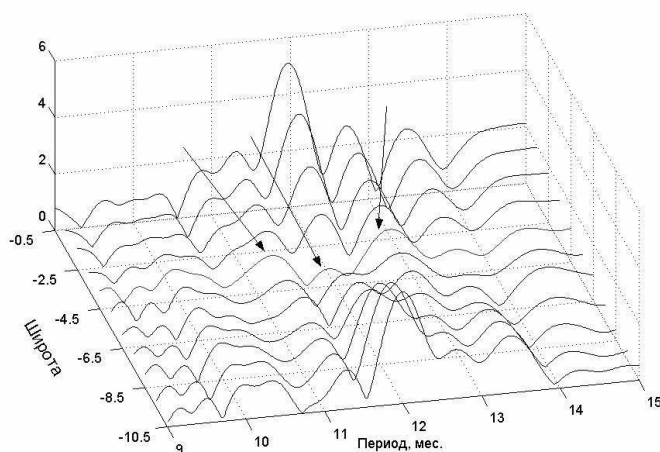


Рис. 4. Результаты анализа спектрального состава колебаний ОСО для периодов от 9 до 15 мес. для области  $0^{\circ}$  -  $10^{\circ}$  ю.ш. и долготы  $151^{\circ}$ Е. Стрелками указан ход гармоник на широте  $4.5^{\circ}$  ю.ш. Вертикальная шкала в ЕД

### Квазидвухлетние колебания ОСО

Максимальные амплитуды квазидвухлетних колебаний в основном наблюдаются для периодов от 28 до 32 мес. Чтобы дать представление о диапазоне вариаций QBO, глобальное распределение амплитуды для ряда гармоник с периодами от 24.5 до 36.5 месяцев показано на рис. 5. В левой части каждой карты представлены наложенные на одну плоскость данные для всех 288 меридиональных разрезов. В тропической области наиболее значительные амплитуды колебаний характерны для гармоник с периодами 28-29 и 32-33 мес. Эти гармоники имеют четко выраженный максимум над экватором и минимум вблизи  $10-12^{\circ}$  северной и южной широт. При этом гармоника с периодом около 28.5 мес. имеет над экватором локальный максимум в районе Индонезии, а гармоника с периодом около 32 мес. – над восточной частью Тихого океана.

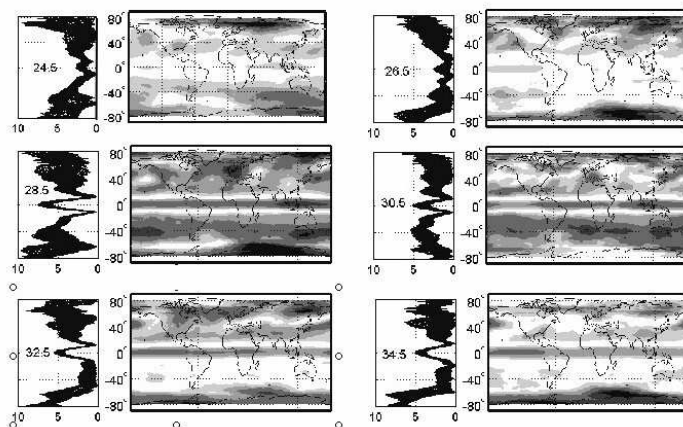


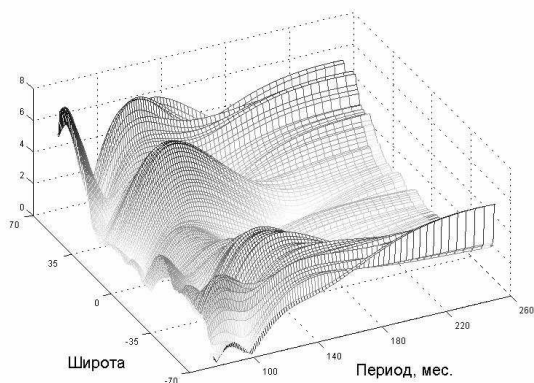
Рис. 5. Распределение амплитуды квазидвухлетних колебаний для периодов от 24.5 мес. до 34.5 мес. Шкала амплитуд для сечений в левой части рисунков дана в ЕД

Узкий и четкий максимум точно над экватором и симметричные минимумы вблизи  $11^{\circ}$  ю.ш. и  $11^{\circ}$  с.ш., как оказалось, имеют только колебания с периодами от 26 до 35 мес. (Этот факт возможно позволяет сузить границы применимости термина "чистые" квазидвухлетние колебания применительно к глобальному полю ОСО [12, 13]). Ряд квазидвухлетних гармоник имеет значительные амплитуды колебаний в средних и высоких широтах. Однако зональное распределение гармоник в средних и высоких широтах неоднородно.

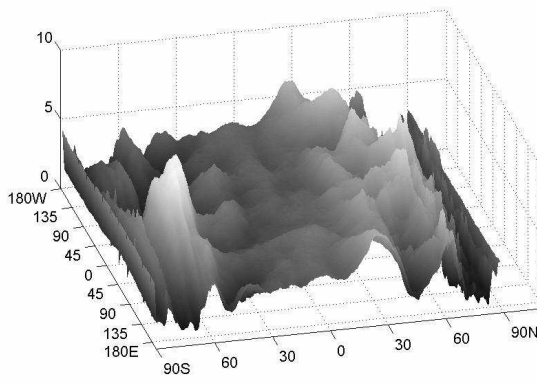
Например, колебания с периодами от 26 до 31 мес. имеют вторичный глобальный максимум расположенный почти симметрично относительно экватора в поясе 20-50° ю.ш. и 20 – 50° с.ш., а колебания с периодами от 31 до 35 мес. имеют максимум только в северном полушарии. На более высоких широтах максимумы квазидвухлетних колебаний локализованы над отдельными регионами и зачастую их амплитуды выше, чем над экватором.

### Квазидесятилетние колебания

В последние годы большое внимание уделялось анализу длиннопериодных колебаний и трендов ОСО. В основном это связано с поиском причин наблюдаемого с начала 80-х годов уменьшения ОСО. На рис. 6а показано пространственное распределение наиболее длиннопериодных гармоник ОСО для меридионального сечения по линии смены дат (180°E). Анализ подобных сечений показал, что пространственное распределение амплитуд гармоник имеет сложную пространственную меридионально - широтную структуру. Достаточно сложно выделить какую-либо основную длиннопериодную гармонику, поскольку периоды и амплитуды наиболее интенсивных колебаний изменчивы. На рис. 6б для примера показано распределение амплитуды колебания с периодом 104 мес. Анализ распределения периодов и амплитуд длиннопериодных гармоник ОСО требует дальнейшего исследования, и видимо здесь будут полезны методы вейвлетного анализа или скользящего оконного спектрального анализа с максимальным возможным разрешением.



а



б

Рис. 6а. Распределение амплитуды длиннопериодных гармоник ОСО для периодов от 80 до 250 мес. (разрез для меридиана 180°E). Амплитуды на вертикальной шкале даны в ЕД.

Рис. 6б. Распределение амплитуды гармоники с периодом 104 мес. Вертикальная шкала в ЕД

### Выводы

Результаты спектрального анализа полей ОСО с пространственным разрешением 1.25° x 1° дают основания для следующих выводов:

- локальные и региональные топографические эффекты проявляются не только в распределении средних значений ОСО, но также и для амплитуды годовой гармоники.
- амплитуда годовой гармоники ОСО в отличие от среднего многолетнего значения минимальна не над экватором, а в узкой полосе 4-5° ю.ш., причем существует область (вблизи Новой Гвинеи), в которой амплитуда годовой гармоники близка к нулю. В этой области удастся выявить ряд спутников годовой гармоники с периодами от 10 до 14 месяцев, происхождение которых предположительно связано с

интерференционными эффектами взаимодействия годовой гармонике ОСО и длиннопериодного колебания с периодом около 18-19 лет.

-узкий и четкий максимум квазидвухлетних колебаний точно над экватором и симметричные минимумы вблизи  $11^\circ$  ю.ш. и  $11^\circ$  с.ш., как оказалось, имеют только колебания с периодами от 26 до 35 мес. Спектральная плотность квазидвухлетних колебаний ОСО в экваториальной области в основном сосредоточена вблизи колебаний с периодами 28.5 и 32 мес. Колебания с периодами от 26 до 31 мес. имеют вторичный глобальный максимум, расположенный почти симметрично относительно экватора в поясе  $20-50^\circ$  ю.ш. и  $20-50^\circ$  с.ш., а колебания с периодами от 31 до 35 мес. имеют максимум только в северном полушарии. На более высоких широтах максимумы квазидвухлетних колебаний локализованы над отдельными регионами и зачастую их амплитуды выше, чем над экватором.

-достаточно сложным оказывается распределение амплитуд длиннопериодных колебаний как в пространственной так и в частотной области.

Наблюдаемая спектральная структура поля ОСО является, возможно, следствием взаимодействия и конкуренции мультиплетных составляющих основных колебаний ОСО (во временной области), влияния локальных и региональных топографических эффектов и глобальных волновых процессов, что в целом приводит к сложной пространственно-временной структуре распределения амплитуд и периодов основных колебаний ОСО.

### Литература

1. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002 // WMO. Geneva. 2003. Rep. No. 47. 498 pp.
2. Scargle J.D. Studies in astronomical time series analysis. 2. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // The Astrophysical Journal. 1982. V.263. P.835-853.
3. Visheratin K.N. Spatial Characteristics of Total Ozone Annual Oscillation in the Tropics // Proceedings of the Quadrennial Ozone Symp. Greece, Kos, 1-8 June. 2004. P. 458-459.
4. Visheratin K.N. Global Maps of Total Ozone QBO from TOMS Data Set // Proceedings of the Quadrennial Ozone Symp. Greece, Kos, 1-8 June 2004. P. 456-457.
5. Вишератин К. Н., Троянов М. М. Пространственное распределение амплитуды длиннопериодных вариаций общего содержания озона по данным спутниковых измерений // 4-я Всероссийская научная конф. "Физические проблемы экологии (экологическая физика)". Москва, 22-24 июня. 2004. С. 9-10.
6. Жеребцов Г.А., Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д., Кошелев В.В. Изучение озонной проблемы в институте солнечно-земной физики СО РАН // Опт. атм. и океана, 1996. Т. 9. №9. С. 1255-1261.
7. Da Silva L. Depletion of the ozone column over west coast of South America // Proceedings of the Quadrennial Ozone Symp. Japan, Sapporo, 3-8 July 2000. P. 823-824.
8. Trenherth K.E., Stepaniak D.P. A pathological problem with NCEP reanalyses in the stratosphere // J.Climate. 2002. V. 15. P. 690-695.
9. Hamilton K., Hertzog A., Vial F., Stenchikov G. Longitudinal variation of stratospheric quasi-biennial oscillation // J. Atmos. Sci. 2004.V. 61. P. 383-402.
10. Гуцин Г.П. Основные особенности в распределении общего содержания атмосферного озона над акваториями океанов // Тр. ГГО, 1976. Вып. 357. С.83-101.
11. Folkins I., Braun C., Thompson A., Witte J. Tropical ozone as indicator of deep convection // J. Geoph. Res. 2002. V. 107. No. D13, doi: 10.1029/2001JD001178.
12. Елисеев А.В., Мохов И.И., Петухов В.К. Моделирование квазидвухлетней цикличности температуры атмосферы и тенденции ее эволюции при климатических изменениях // Изв. АН СССР. Физ. атм. и океана. 1997. Т. 33. №6. С. 733-742.
13. Baldwin M.P., Gray L.J., Dunkerton T.J., Hamilton K., et al. The quasi-biennial oscillation. // Rev. Geoph. 2001.V. 39. P. 179-229.