

Пространственно-временные вариации фазы основных колебаний общего содержания озона по данным спутниковых измерений TOMS-SBUV

К.Н. Вишератин^{1,2}, В.В. Кузнецов²

¹Институт экспериментальной метеорологии ФГБУ НПО «Тайфун»,

249038, г. Обнинск, Победы, 4

E-mail: kvisher@typhoon.obninsk.ru

²Институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ

249040, г. Обнинск, Студгородок, 1

E-mail: kuznetsov48@list.ru

Представлены результаты исследования пространственно и временной изменчивости фаз основных колебаний общего содержания озона на основе анализа спутниковых данных. Метод выделения фазы основан на реконструкции временных рядов в выбранных спектральных интервалах и анализе вариаций фазы таких композитных рядов во времени и в пространстве. Рассмотрены вариации фазы полугодовых и годовых гармоник, а также квазидвухлетних, квазипятилетних и квазидесятилетних колебаний в широтной зоне 65°S – 65°N за 1979–2008 гг.

Ключевые слова: общий озон, спутниковые данные, спектральный анализ, пространственно-временные вариации, фаза колебаний, композитный метод.

Введение

Актуальность изучения пространственно-временных вариаций общего содержания озона (OCO) определяется рядом факторов, таких как влияние на радиационный и химический баланс стратосферы, защита от биологически активного УФ излучения. К настоящему времени накоплен достаточно большой массив спутниковых данных о глобальных полях общего озона. Исследованию этих данных посвящено немало работ статистического плана, в которых был определен ряд особенностей глобального распределения, основные гармонические и квазипериодические составляющие, определяющие вариации OCO в пространстве и времени. Однако изменчивость фазовых соотношений вариаций OCO исследовалась на наш взгляд недостаточно. Это в первую очередь связано со сложностью анализа колебаний, периоды которых непостоянны как во времени, так и в пространстве. В данной работе приведены результаты использования композитного метода для анализа вариаций и структуры фазовых соотношений основных колебаний глобального поля OCO по данным спутниковых измерений TOMS-SBUV.

Данные и методы анализа

Первый используемый в работе массив данных (<http://www.toms.gsfc.nasa.gov>) представляет собой среднемесячные значения OCO с разрешением 1 * 1.25 гр. по данным 8-й версии Total Ozone Mapping Spectrometer (далее TOMS) за 1979–2005 гг. Второй массив (http://hyperion.gsfc.nasa.gov/Data_services/merged) – зонально-усредненные (65°S – 65°N, шаг 5° по широте) среднемесячные значения версии Merged TOMS-SBUV Total Ozone Data, Revision 05, 2009 (далее MOD) за 01.1979–12.2008 гг. Небольшие пропуски в данных MOD были заполнены методом кубической интерполяции.

Исследование спектральных характеристик рядов OCO и их временной изменчивости проводилось с помощью классического и модифицированного (Scargle, 1982) Фурье-анализа, метода максимальной энтропии Берга, вейвлет-анализа. При необходимости получить более точные данные об изменчивости частот гармоник в течение анализируемого периода измерений использу-

зовались оконные скользящие преобразования (подробнее см. Вишератин, Карманов, 2008). Известно, что в большинстве геофизических рядов относительно стабилен только период годовой гармоники и ее обертонов. Период других гармоник в пространстве и во времени меняется и их скорее можно отнести к квазипериодичностям. Нами был разработан композитный метод анализа временных рядов, связанный с декомпозицией изучаемых рядов и реконструкцией квазипериодических составляющих методами обратного преобразования Фурье. Суть метода состоит в следующем. Предварительно для каждого из анализируемых рядов исключали линейный тренд и вычисляли Фурье-преобразование с шагом по частоте 0.0001 мес^{-1} для периодов от 2 до 250 мес. Для выбранных спектральных интервалов, содержащих основные колебания или для суммы гармоник вблизи основных, заранее определенных квазипериодических составляющих, вычислялось обратное Фурье-преобразование и строился композитный временной ряд. Период и амплитуда таких композитных рядов с течением времени может меняться и характеризует изменчивость вариаций ОСО в выбранном спектральном интервале.

Вариации максимумов амплитуд композитных рядов дают возможность судить о пространственном и временном распределении фаз соответствующих колебаний. Отметим также, что результаты исследования приведены для диапазона широт от 65°S до 65°N , поскольку данные спутниковых наблюдений для широт более 70° не вполне надежны из-за значительных пропусков в измерениях.

Результаты анализа

Пространственное распределение ряда параметров основных колебаний общего озона было ранее рассмотрено в (Вишератин и др., 2006, Вишератин и Троянов, 2006, Вишератин, 2007, Вишератин, Васильев, Сизов, 2008, Вишератин, 2012, Visheratin, 2004). Помимо полугодовой и годовой гармоник были выделены квазипериодические составляющие, расположенные в спектральных интервалах 25–36 мес., 40–60 мес., 90–144 мес. и простроены глобальные карты распределения этих колебаний. Поэтому в данной работе приводятся только результаты анализа вариаций фазы композитных рядов в указанных интервалах. Амплитуды колебаний общего озона на всех рисунках указаны в единицах Добсона, ДЕ.

Годовая гармоника имеет наибольшие амплитуды (за исключением тропиков, где преvalируют квазидвухлетние колебания). Хотя период годовой гармоники один из наиболее стабильных, он может немного отличаться от 12 мес. Для изучения особенностей пространственной и временной изменчивости фазы годовой гармоники на основе данных MOD были составлены композитные ряды для области периодов 11.5–12.5 мес. На рис. 1 в качестве примера показаны композитные ряды для 2-х интервалов времени, а усредненный за 1979–2008 гг. широтный ход фазы максимума годового колебания показан на рис. 2.

На рис. 1 заметна стабильная система экстремумов амплитуд годовых колебаний севернее 40°N и в зоне $35\text{--}55^{\circ}\text{S}$. Эти колебания происходят в Северном и Южном полушариях почти точно в противофазе и соответствуют моментам равноденствий. Непрерывная и почти линейная задержка фазы максимума годового колебания, почти более чем на полгода, происходит в северных субтропиках и тропиках в широтной зоне $40^{\circ}\text{N}\text{--}10^{\circ}\text{S}$. Отметим также асимметрию хода фазы в северных и южных субтропиках, возможные причины которой связаны вероятнее всего с динамическими процессами, обусловленными преобладанием к югу от экватора в основном океанической подстилающей поверхности. Южнее 50°S , где расположена прилегающая к Антарктиде океанская территория, происходит задержка фазы максимума годовых колебаний примерно на 4 месяца, что, вероятно, связано с влиянием антарктического циркумполярного вихря. Представленный на рис. 2 широтный ход достаточно хорошо согласуется с данными, приведенными за 1957–1964 гг. в работе (Хргиан, 1973), если учесть, что эти данные были получены на основе немногочисленных наземных наблюдений.

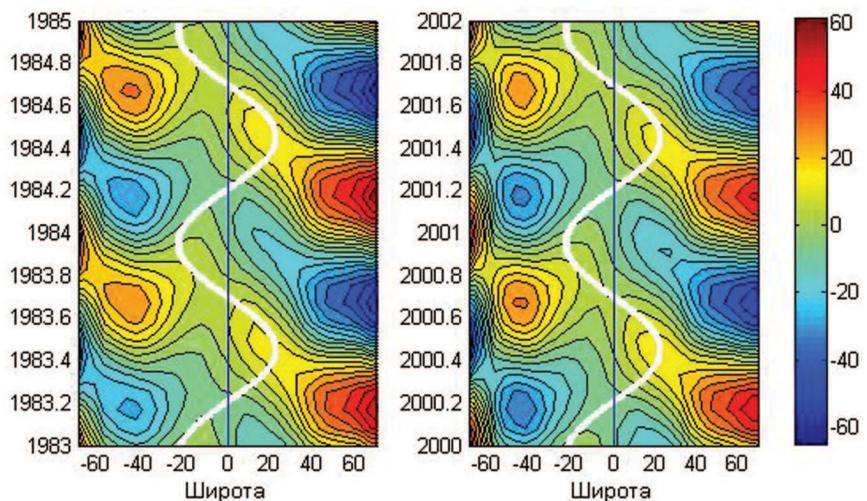


Рис. 1. Пространственно-временное распределение амплитуды колебаний общего озона (в единицах Добсона, ДЕ) для годовой гармоники в 1983-1984 и в 2000-2001 гг. Белая кривая показывает пространственно-временной ход максимума солнечной инсоляции

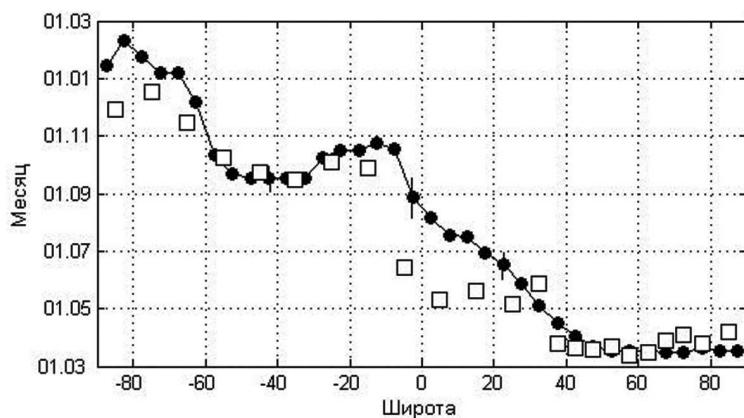


Рис. 2. Средний за 1979-2008 гг. широтный ход фазы максимума годовых колебаний общего озона (точки). Вертикальный отрезок – погрешность определения моментов максимумов на уровне 1 σ . Квадратики – данные наземных измерений (Хргиан, 1973) за 1957-1964 гг.

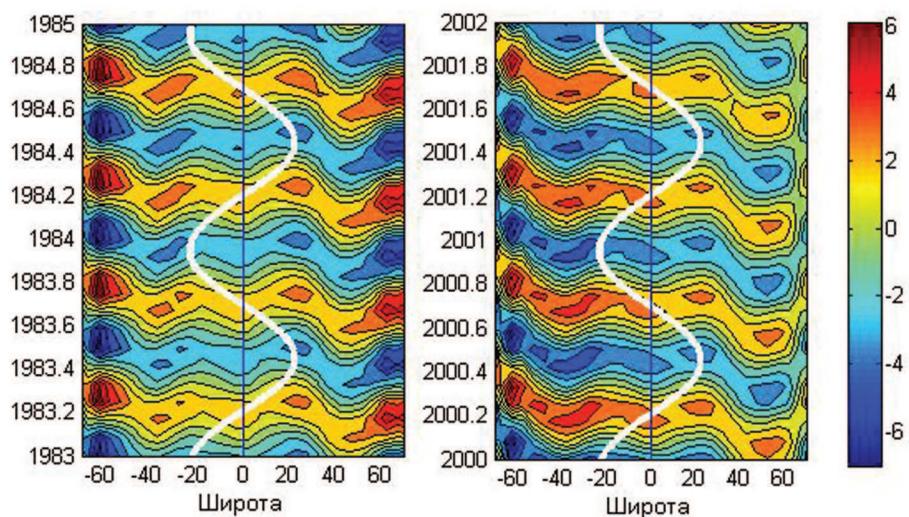


Рис. 3. Пространственно-временное распределение амплитуды колебаний общего озона для полугодовой гармоники. Белая кривая показывает пространственно-временной ход максимума солнечной инсоляции

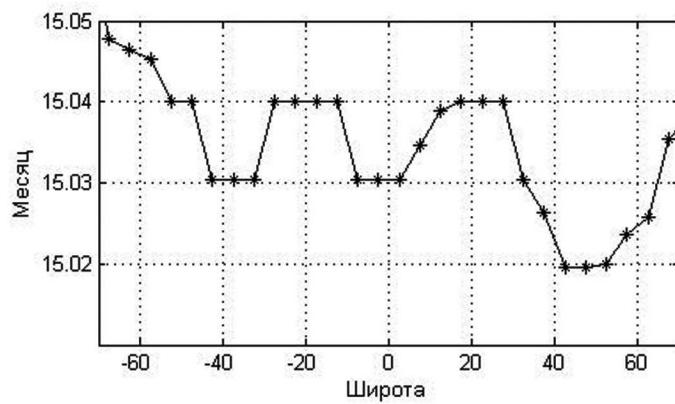


Рис. 4. Средний за 1979-2008 гг. широтный ход фазы максимума полугодового колебания общего озона. Вертикальный отрезок – погрешность определения на уровне 1σ

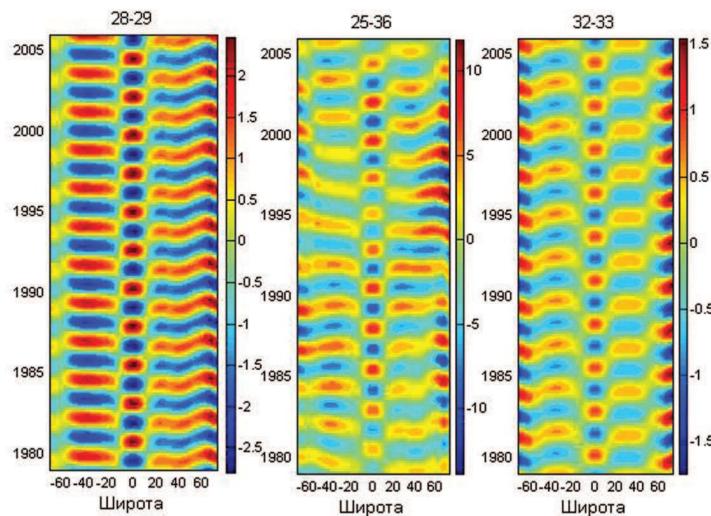


Рис. 5. Пространственно-временное распределение амплитуды колебаний общего озона для квазидвухлетних колебаний с периодами 28-29, 25-36 и 32-33 мес.

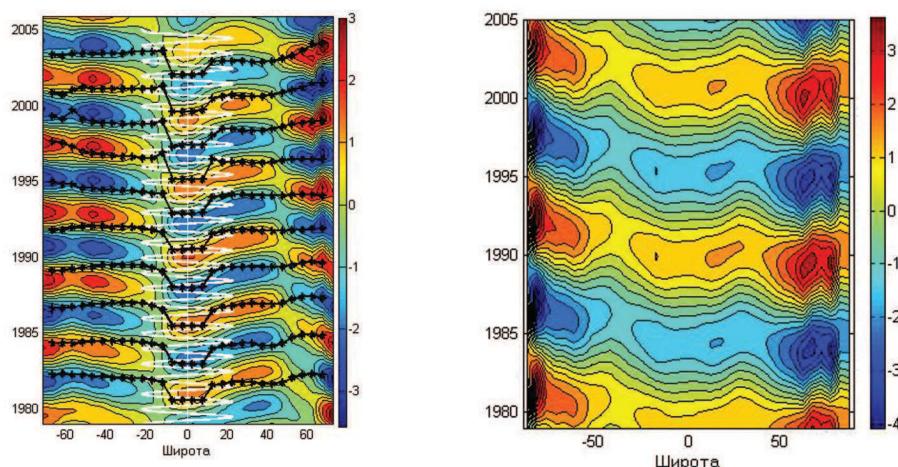


Рис. 6. Пространственно-временное распределение амплитуды колебаний общего озона для квазиатмосферных колебаний с периодами 50-60 мес. Белая кривая – пространственно-временной ход максимума солнечной инсоляции, черная кривая – фаза максимума квазидвухлетних колебаний для периодов 24-36 мес.

Рис. 7. Пространственно-временное распределение амплитуды колебаний общего озона для квазидесятилетних колебаний

Период полугодовой гармоники с широтой немного изменяется и возрастает по мере движения на юг от 5.97 до 6.02 мес. Композитные ряды для (5.9–6.1 мес.) для двух интервалов времени 1983–1985 и 2000–2002 гг. показаны на рис. 3, а усредненный за 1979–2008 гг. широтный ход фазы полугодового колебания показан на рис. 4. Вторая полугодовая гармоника отстает на 0.5 года. Неучет этого обстоятельства привел в работе (Bowman, 1989) к неверному построению широтного хода полугодовой гармоники. Из рис. 3 и 4 следует, что фаза максимума полугодовых колебаний при смещении с севера на юг в среднем отстает. Обращает внимание широтная зона 40–50°N, в которой максимум колебаний наступает первым. Такое поведение фазы полугодовых колебаний в умеренных широтах Северного полушария требует дальнейшего изучения. Особенностью распределения фазы максимума полугодовых колебаний в полосе 35°N–35°S является симметричность вблизи моментов равноденствий (с небольшим смещением) относительно экватора (рис. 3 и 4). Во время солнцестояний амплитуда полугодовой гармоники в тропиках имеет минимальные значения (рис. 3), что вероятнее всего обусловлено фотохимическими процессами за счет солнечной инсоляции и возможным влиянием циркуляционных ячеек, проявляющихся в тропосфере тропиков как ячейки Гадлея.

Квазидвухлетние колебания (КДК) обычно связывают с изменчивостью направления экваториального стратосферного ветра. Одной из основных особенностей пространственного распределения КДК общего озона является переворот фазы колебаний почти на 180 градусов относительно экватора на широтах 11–12°S и 11–12°N, т.е. в области минимума амплитуды квазидвухлетних колебаний (Вишератин, Троинов, 2006, Jiang et al, 2005). В обоих полушариях вблизи 40–50 градусов наблюдаются максимумы внетропических квазидвухлетних колебаний. Диапазон, к которому можно отнести квазидвухлетние колебания в общем озоне, ограничен периодами от 24–25 до 35–36 мес., т.к. только для таких колебаний характерны резкие максимумы точно над экватором и симметричные минимумы вблизи 10–12°S и 10–12°N (Visheratin, 2004). На рис. 5 показаны композитные ряды для суммы гармоник от 25 до 36 лет и для двух наиболее интенсивных колебаний вблизи 28.6 и 32.8 мес.

Колебания с периодами 28–29 и 32–33 мес. в отличие от колебаний для всего интервала от 25 до 36 мес. имеют достаточно стабильную систему экстремумов в течение всего анализируемого периода. Максимальные амплитуды над экватором наблюдались приблизительно в 1985 г. и в 2004 г., а минимальная — в 1995 г. Это связано с периодическим совпадением (биением) колебаний 28.6 и 32.8 мес. через интервал времени примерно 224 мес. или 18.7 лет. Следует отметить, что этот интервал близок к периоду повторения узлов лунной орбиты 18.6 лет. Из представленного на рис. 6 широтного хода фазы КДК следует, что фаза максимумов колебаний в северном полушарии в области 20–40°N опережает фазу максимумов в области 20–50°S примерно на 3–4 мес., т.е. относительно экватора колебания не точно противофазны. Из рис. 6 следует также, что в Северном полушарии внетропические КДК отстают от экваториальных в среднем на 1.2–1.3 года, а в Южном примерно на 1.5 года. Любопытно, что в южных тропиках фаза КДК относительно экватора практически стабильно отстоит на 1.5 года, а в Северном полушарии наблюдается разброс фаз, достигающий полугода. В высоких широтах Северного и Южного полушарий расположена еще одна система экстремумов КДК с фазой, отличающейся от фазы КДК как экваториальных так и умеренных широт.

Квазипятилетние колебания с периодами от 50 до 60 месяцев наблюдаются наиболее четко в обширной зоне примерно от линии смены дат до побережья Южной и Северной Америки (в полосе от 10°S до 30°N). Распределение фазы для квазипятилетних колебаний достаточно сложное и не вполне отчетливое (рис. 6). Характерна асимметрия относительно экватора, отметим также противофазность колебаний над экватором и в более южных широтах с границей смены фазы вблизи 15°S. Квазипятилетние колебания не синхронизированы ни с ходом солнечной инсоляции, ни с фазой квазидвухлетних колебаний. Отметим также,

что за анализируемый временной интервал экстремумы колебаний во внутропических широтах имели тенденцию к смещению в южном направлении.

Квазидесятилетние колебания общего озона наиболее часто рассматриваются в связи 11-летней цикличностью солнечной активности (Coughlin, Tung, 2004, Вишератин, 2012). Фаза максимума амплитуды квазидесятилетних колебаний имеет довольно четкую тенденцию отставать при движении с севера на юг, так что колебания с периодами от 90 до 144 месяцев происходят в высоких северных и южных широтах с фазовой задержкой 2–3 года (рис. 7).

Максимум амплитуды наступает вначале в северных умеренных и высоких широтах, сравнительно быстро смещается в пространстве за промежуток около полугода к тропикам, а в целом, примерно за 1–1.5 года смещается от 60°N до 60°S. Если привлечь не очень надежные данные для широт выше 65°, то фаза максимума квазидесятилетних колебаний смещается от северного до южного полюса примерно за 2.5 года. В высоких умеренных широтах Северного полушария максимум колебаний наступает в начальной фазе максимума солнечной активности. В тропиках фаза озона на протяжении последних трех циклов солнечной активности оставалась близка к середине фазы максимума солнечной активности, а в южных умеренных широтах максимумы ОСО соответствуют примерно финальной стадии фазы максимума солнечной активности. Подробнее фазовые соотношения для квазидесятилетних колебаний рассмотрены в работе (Вишератин, 2012).

Основные выводы

Анализ пространственной и временной изменчивости фаз основных колебаний общего содержания озона композитным методом, основанным на реконструкции временных рядов в выбранных спектральных интервалах, показал:

- характерным для годовых колебаний (сумма гармоник с периодами от 11.5 до 12.5 мес.) является запаздывание максимума годовой гармоники при движении с севера на юг, синхронизация с ходом солнечной инсоляции и наличие широтных зон в южном и северном полушарии, в которых колебания происходят в противофазе;
- особенностью распределения фазы максимума полугодовых колебаний в полосе 35°N–35°S является симметричность относительно экватора вблизи моментов равноденствий. Обращает внимание область 40–50°N, в которой фаза максимума колебаний наступает раньше, чем в других широтных зонах;
- основная особенность квазидвухлетних колебаний с периодами от 25 до 36 мес. — узкий и резкий максимум колебаний над экватором и симметричные минимумы на широтах 10–12°N и 10–12°S относительно которых происходит переворот фазы колебаний почти на 180 градусов. Однако фазы квазидвухлетних колебаний в умеренных широтах обоих полушарий с течением времени могут смещаться относительно фазы колебаний над экватором, что связано с биением колебаний вблизи 28.6 и 32.8 мес;
- для квазипятилетних колебаний с периодами 50–60 мес. характерна асимметрия относительно экватора и противофазность колебаний над экватором и в более южных широтах с границей смены фазы вблизи 15°S;
- квазидесятилетние колебания с периодами от 90 до 144 месяцев в высоких северных и южных широтах различаются по фазе на 2–3 года. Пространственное распределение фазы квазидесятилетних вариаций ОСО таково, что в северных умеренных широтах максимум колебаний совпадает с начальной фазой максимума солнечной активности, в тропиках максимум колебаний отстает на 0.5–1 год и приходится на фазу максимума, а в южных умеренных широтах максимум колебаний наступает с задержкой до 2 лет и совпадает с конечной фазой солнечной активности.

В целом для большинства рассмотренных колебаний фаза колебаний отстает по мере смещения от северных широт к южным. Представленные в работе тенденции временной и пространственной изменчивости фазы основных колебаний общего озона могут найти применение в задачах моделирования и прогноза озонового слоя.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант 10-05-00356.

Литература

1. Вишератин К.Н., Каменоградский Н.Е., Кашин Ф.В. и др. Спектрально–временная структура вариаций общего содержания озона в атмосфере центральной части Евразии // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 2. С. 205-223.
2. Вишератин К.Н., Троянов М.М. Глобальное распределение по данным спутниковых измерений (ТОМС) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Вып. 3. Т. 1. С. 257-262.
3. Вишератин К.Н. Межгодовые вариации и тренды среднезональных рядов общего содержания озона, температуры и зонального ветра // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 4. С. 67-85.
4. Вишератин К.Н., Васильев В.И., Сизов Н.И. 11-летняя цикличность в общем содержании озона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. I. С. 429-434.
5. Вишератин К.Н. Фазовые соотношения между квазидесятилетними колебаниями общего содержания озона и 11-летним циклом солнечной активности // Геомагнетизм и Аэрономия. 2012. Т. 52. № 1. С. 99-108.
6. Вишератин К.Н., Карманов Ф.И. Практические методы оценивания спектральных параметров. Обнинск: ИАТЭ. 2008. 60 с. (<http://www.typhoon.obninsk.ru/last/papers>).
7. Хргиан А.Х. Физика атмосферного озона. Л.: Гидрометеоиздат. 1973. 292 с.
8. Bowman K.P. Global Patterns of the Quasi-biennial Oscillation in Total Ozone // J. Atm. Sci. 1989. V. 46. N 21. P. 3328-3343.
9. Coughlin K.T., Tung K.K. 11-Year solar cycle in the stratosphere extracted by the empirical mode decomposition method // Adv. Space Res. 2004. V. 34(2). P. 323-329.
10. Jiang X., Jones D. B. A., Shia R., Waliser D. E., Yung Y. L. Spatial patterns and mechanisms of the quasi-biennial oscillation—annual beat of ozone // J. Geophys. Res. 2005. 110. D23308. doi:10.1029/2005JD006055.
11. Scargle J.D. Studies in astronomical time series analysis. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // Astrophys. Journal. 1982. V. 263. P. 835-853.
12. Visheratin K.N. Spatial Characteristics of Total Ozone Annual Oscillation in the Tropics // Proceedings of the Quadrennial Ozone Symp., Greece, Kos. 2004. P. 458-459.

Spatiotemporal variations of the phase of total ozone basic oscillations from satellite data TOMS-SBUV

K.N. Visheratin^{1,2}, V.V. Kuznetsov²

*¹Institute of Experimental Meteorology of RPA «Typhoon»,
249038, Obninsk, Pobedy, 4
E-mail: kvisher@typhoon.obninsk.ru*

*²Institute for Nuclear Power Engineering of NRNU «MEPhI»
249040, Obninsk, Stutgorodok, 1
E-mail: kuznetsov48@list.ru*

Spatial and time variability of the phases of basic total ozone oscillations are analyzed on the basis of satellite data. The method of allocation of a phase is based on reconstruction of composite time series in the selected spectral intervals and on analysis of the phase variations of such composite time series in time and in space. Variations of the phase of semi-annual and annual harmonics, and also quasi-biennial, quasi-five years' and quasi-decadal oscillations from 65°S to 65°N for 1979-2008 are considered.

Keywords: total ozone, satellite data, spectral analysis, spatiotemporal variability, phase of oscillations, composite method.