

Основные характеристики изменчивости глобального поля общего содержания озона на основе сопоставления объединенных баз данных

К.Н. Вишератин^{1,2}, В.В. Кузнецов²

¹*Институт экспериментальной метеорологии ФГБУ НПО «Тайфун»
Обнинск, 249038, Россия*

E-mail: kvisher@rpatyphoon.ru

²*Институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, Обнинск, 249040, Россия
E-mail: kuznetsov48@list.ru*

Приведены основные характеристики пространственной и временной изменчивости глобально усредненных и среднезональных значений общего содержания озона (ОСО) на основе анализа объединенных баз спутниковых данных SBUV Merged Total And Profile Ozone Data, Version 8.6 (V86) в области 60° ю.ш. – 60° с.ш. и Bodeker Scientific Combined Total Column Ozone Database (BS) в области 90° ю.ш. – 90° с.ш. за 1979–2012 гг. В широтной области 60° ю.ш. – 60° с.ш. относительные отклонения (V86-BS)/V86 между средними значениями сезонного хода для широтного пояса 60° ю.ш. – 60° с.ш. не превышают 3%. Значения линейных трендов близки к нулю вблизи экватора. Максимальные отрицательные тренды наблюдаются вблизи (50–60)° ю.ш. и достигают -0.6 еД/год. Величины среднезональных трендов BS в пределах погрешности совпадают с трендами, вычисленными для данных V86, а систематическое отклонение трендов или дрейф не превышает для большинства широтных зон 0.1 еД/год. Фазы короткопериодных и длиннопериодных колебаний V86 и BS хорошо согласуются. Сопоставление глобально-усредненных среднемесячных значений ОСО в широтном интервале 60° ю.ш. – 60° с.ш. (V86) и 90° ю.ш. – 90° с.ш. (BS) показало, что фаза годового колебания по данным BS опережает фазу годового колебания V86 примерно на 3 месяца. Фазовые соотношения по данным BS и V86 хорошо согласуются для области квазидвухлетних колебаний и колебаний с периодами более 70 мес.

Ключевые слова: общий озон, пространственно-временные вариации, тренды, кросс-вейвлетный анализ, спутниковые данные

*Одобрена к печати: 08.04.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-165-172*

Введение

Озоновый слой играет ключевую роль в радиационном и химическом балансе стратосферы и экранирует биологически активное УФ излучение. Для анализа глобальных полей общего содержания озона (ОСО) в течение длительного периода (с конца 1978 г. по 2005 г.) использовались спутниковые данные прибора TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) на ИСЗ Nimbus-7, Meteor-3 и Earth Probe (EP). С 2004 г. по настоящее время измерения ОСО ведутся с помощью аппаратуры Ozone Monitoring Instrument (OMI) на борту ИСЗ EOS AURA. В 2012 г. была представлена (Labow et al., 2013; McPeters et al., 2013) база данных ОСО, основанная только на данных измерений приборами BUV/SBUV/SBUV2 (SBUV Merged Total And Profile Ozone Data, далее V86), которая была рекомендована разработчиками для анализа трендов и длиннопериодной изменчивости полей озона. Одной из причин создания этой базы является сдвиг результатов измерений ОСО прибором OMI относительно данных TOMS, причины которого не находят на сегодняшний день объяснений (Labow et al., 2013). Все перечисленные базы данных содержат сезонные пропуски в высоких широтах обоих полушарий. Объединенная база данных, охватывающая весь земной шар, была создана коллективом Bodeker Scientific (далее BS). При создании базы была проведена коррекция данных OMI, для заполнения пропусков в измерениях использовались данные ряда других спутниковых измерений и наземных наблюдений

и методы линейной интерполяции в узлы сетки в случае отсутствия данных (Bodeker et al., 2013). Главным достоинством этой базы данных является охват приполярных областей и практическое отсутствие пропусков. Вместе с тем использование разнородных данных при формировании BS оставляет открытым вопрос о возможности использования этой базы данных в климатических исследованиях.

В настоящей работе на основе сопоставления объединенных баз данных V86 и BS рассмотрены основные характеристики изменчивости общего содержания озона, к которым обычно относят сезонную изменчивость, широтный ход, длиннопериодные колебания и тренды среднезональных и глобально-усредненных значений ОСО (например, Chehade et al., 2014; Frith et al., 2014). Одна из основных целей работы – выяснить, насколько эти характеристики отличаются в совпадающей широтной области (60° ю.ш. – 60° с.ш.), и можно ли использовать базу данных BS для анализа длиннопериодных колебаний и трендов. Поскольку при оценках влияния на вариации ОСО различных факторов часто используют глобально-усредненные временные ряды ОСО, то одной из целей работы является также анализ отличий временных рядов ОСО, полученных усреднением данных V86 (60° ю.ш. – 60° с.ш.) и BS (90° ю.ш. – 90° с.ш.). Для оценки фазовых соотношений между среднезональными и глобально-усредненными временными рядами V86 и BS в работе дополнительно использованы методы кросс-корреляционного и кросс-когерентного вейвлетного анализа.

Исходные данные

Первый массив среднезональных среднемесячных значений ОСО (90° ю.ш. – 90° с.ш., шаг 5° по широте) был сформирован на основе базы данных Bodeker Scientific Combined Total Column Ozone Database, Version 28 за 1979-2012 гг. (<ftp://ftp.bodekerscientific.com>). Этот массив данных содержит 4 небольших пропуска (1-2 мес.) в средних широтах в 1993, 1994 и 1995 гг. Второй массив среднемесячных зонально-усредненных значений ОСО (75° ю.ш. – 75° с.ш., шаг 5° по широте) основан на измерениях аппаратурой SBUV/SBUV2 за 1979-2012 гг. (<http://acdb-ext.gsfc.nasa.gov>). В этом массиве данных имеются значительные сезонные пропуски в области 60-75 градусов в обоих полушариях, а также небольшие пропуски в отдельных широтных зонах (3 мес. в 1984 г. и 1 мес. в 1991 и 1995 гг.). Для заполнения небольших пропусков был использован метод кубической интерполяции (Вишератин, 2007, 2012).

Результаты анализа

Сезонный ход среднезональных значений ОСО по данным BS и V86 за 1979-2012 гг. представлен на *рис. 1а-в*. Относительные отклонения между средними значениями сезонного хода для широтного пояса 55° ю.ш. – 60° с.ш. не превышают 2% и возрастают до 10% в более южных широтах (*рис. 1в*), при этом наибольшие отклонения наблю-

даются в период с августа по декабрь. Примерно такая же картина наблюдается и для среднегодовых среднезональных значений (*рис. 1г*), только в этом случае относительные отклонения не превышают 3%. Величины среднезональных трендов BS в пределах погрешности совпадают с трендами, вычисленными для данных V86 (*рис. 1д*), и для более высоких широт (60-80)° ю.ш. согласуются с трендами, приведенными в работе (Frith et al., 2014). Систематическое отклонение трендов или дрейф трендов (в англоязычной литературе «drift», «trends of difference») не превышает для большинства зон 0,1 еД/год (*рис. 1е*). В ряде работ при анализе различных баз данных ОСО проводится сопоставление временных рядов, усредненных в значительных широтных интервалах 60° ю.ш. – 30° ю.ш., 30° ю.ш. – 30° с.ш., 30° с.ш. – 60° с.ш. и 60° ю.ш. – 60° с.ш. (например, Chehade et al., 2014; Frith et al., 2014). Подобный анализ для данных V86 и BS показал, что различие в средних за весь период измерений значениях ОСО во всех указанных широтных интервалах не превышает 1,6 еД или 0,6%, а коэффициенты корреляции временных рядов превышают 0,9 (95%).

Известно, что фазы основных колебаний ОСО (годовая и полугодовая гармоника, квазидвухлетние и квазидесятилетние вариации) с широтой смещаются (Вишератин, Кузнецов, 2012). Для оценки того, имеются ли фазовые различия между данными V86 и BS для указанных выше широтных интервалов, был применен метод кросс-вейвлетного преобразования (Grinsted et al., 2004). По результатам кросс-вейвлетного анализа (не показаны), фазовые соотношения как для короткопериодных вариаций (периоды менее 18 мес.), так и более длиннопериодных колебаний достаточно хорошо согласуются. При этом в области длиннопериодных колебаний лучшее согласие наблюдается для квазидвухлетних и квазидесятилетних вариаций, что связано, вероятно, с их относительно большой амплитудой. Таким образом, на основе проведенного анализа можно сделать вывод, что в совпадающей широтной области 60° ю.ш. – 60° с.ш. основные характеристики поля ОСО, в том числе длиннопериодные вариации и тренды, по данным V86 и BS хорошо согласуются.

При анализе влияния на вариации ОСО различных факторов, таких как, например, солнечная активность, часто используют основанные на данных TOMS – SBUV глобально-усредненные (60° ю.ш. – 60° с.ш.) временные ряды ОСО (например, Stolarski, Frith, 2006; Frith et al., 2014). Глобально-усредненный временной ряд по данным BS (90° ю.ш. – 90° с.ш.), судя по результатам, представленным на *рис. 1*, должен отличаться от ряда V86. Рассмотрим глобально-усредненные временные ряды (*рис. 2а*) по данным V86 (60° ю.ш. – 60° с.ш.) и BS (90° ю.ш. – 90° с.ш.). Из *рис. 2а* следует, что фаза годового колебания по данным BS опережает фазу вариаций V86. Амплитуда годового колебания BS примерно в два раза выше, чем по данным V86, что обусловлено высокими значениями ОСО в северных приполярных и низкими в южных приполярных широтах (*рис. 1а, 1г*). Так как, согласно *рис. 1а*, южнее 60° ю.ш. происходит резкий сдвиг фазы сезонного хода ОСО, связанный с изоляцией Антарктиды циркумполярным вихрем и Антарктической озоновой аномалией, то фазовые соотношения между рядами должны претерпеть

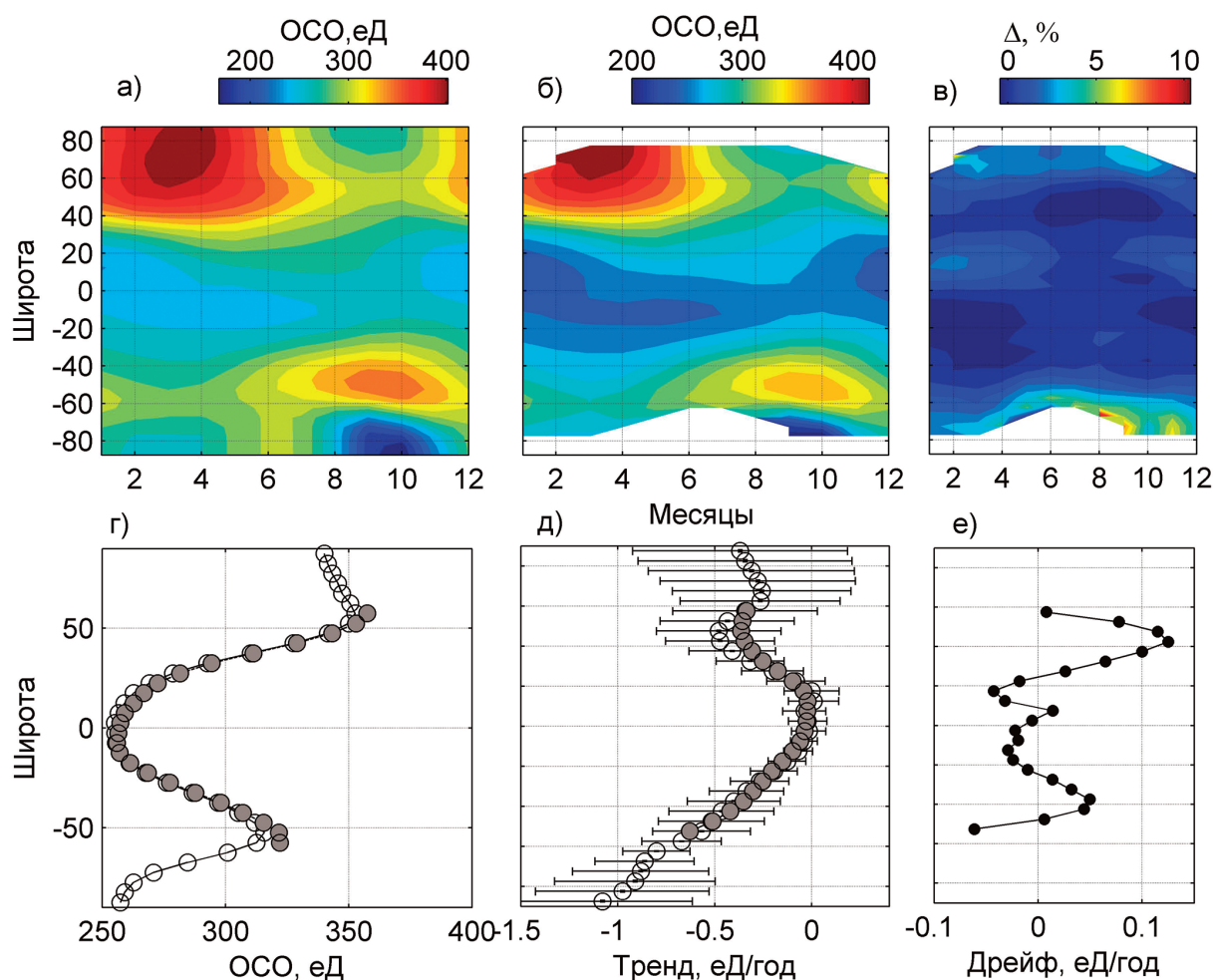


Рис. 1. Широтный ход некоторых характеристик среднезональных значений OCO .
Верхний ряд. Сезонный ход среднемесячных среднезональных OCO за 1979-2012 гг. в области 90° ю.ш. – 90° с.ш. по данным BS (а), и в области 75° ю.ш. – 75° с.ш. по данным V86 (б) и их относительное отклонение $\Delta = (V86-BS)/V86$ в % (в). Согласно данным BS в северном полушарии минимум OCO (~272 еД, сентябрь) располагается вблизи Северного полюса, а максимум (~411 еД, март-апрель) вблизи $70^\circ - 75^\circ$ с.ш.. В высоких широтах южного полушария по данным BS наблюдаются два минимума OCO . Основной минимум в сентябре-октябре (~168 еД) совпадает по времени с периодом формирования Антарктической озоновой аномалии, а второй слабый минимум (~262 еД) наблюдается в марте.
Нижний ряд. г) - среднегодовые среднезональные значения OCO за 1979-2012 гг., в области 90° ю.ш. – 90° с.ш. по данным BS (кружки) и в области 60° ю.ш. – 60° с.ш. по данным V86 (заполненные кружки). Для среднегодовых среднезональных значений разница между данными V86 и BS в тропиках не превышает 5 еД (2%), и достигает 10 еД (3%) вблизи 60° ю.ш. д) – среднемесячные среднезональные линейные тренды. е) - тренд относительных отклонений V86-BS (дрейф)

изменения. Для оценки этих изменений используем методы кросс-вейвлетного анализа (Grinsted et al., 2004). Результаты расчетов спектра вейвлет-когерентности представлены на рис. 2б.

Из рис. 2б следует, что фаза годового колебания BS опережает фазу вариаций V86 в среднем на 90° или примерно на 3 месяца. Несмотря на фазовый сдвиг в области 9-16 месяцев, наблюдается синхронизация колебаний в значительном частотно-временном интервале более длиннопериодных вариаций. Вероятной причиной синхронизации колебаний может быть незначительность влияния сдвига фаз в сезонном ходе на более

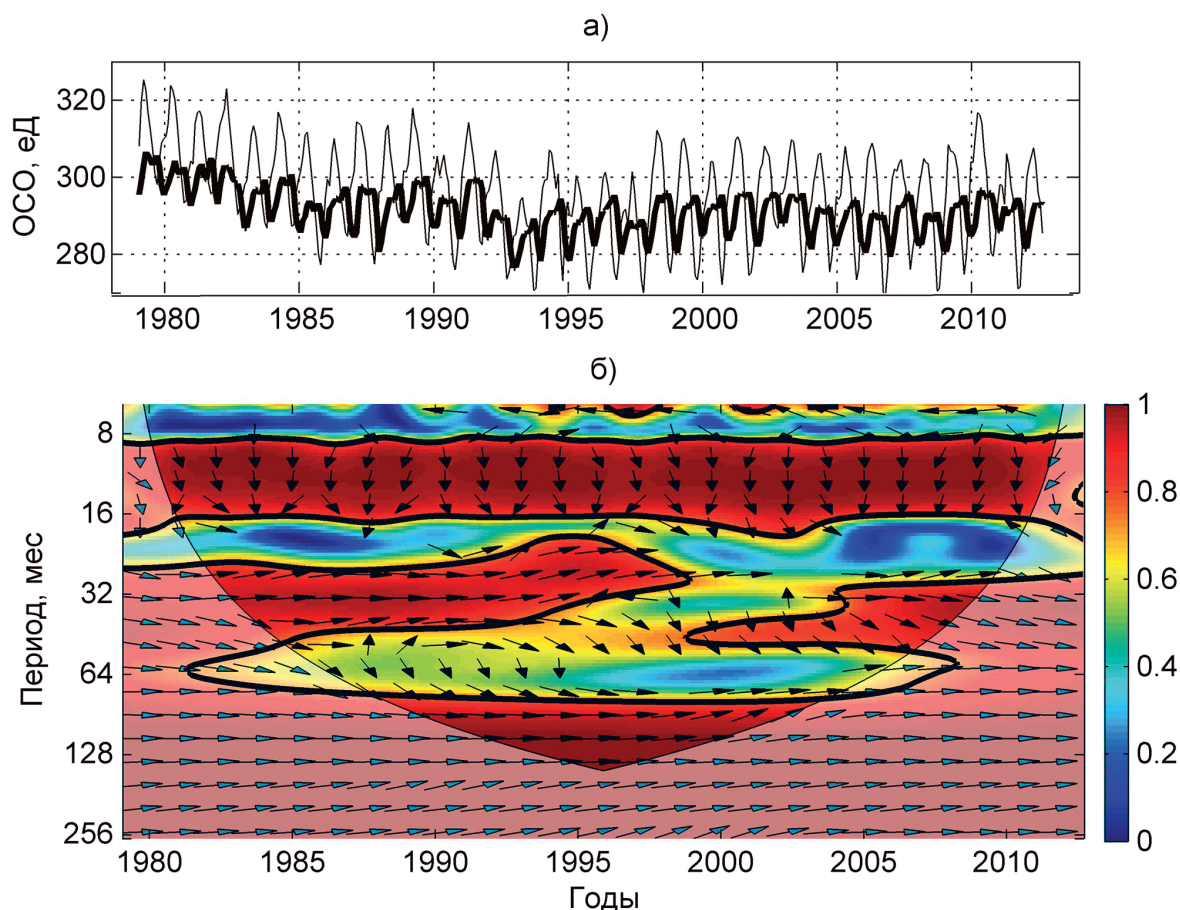


Рис. 2. Глобально-усредненные ряды ОСО по данным BS (90° ю.ш. – 90° с.ш.) и V86 (60° ю.ш. – 60° с.ш.). а) Исходные временные ряды BS (тонкая линия) и V86 (жирная линия). б) Кросс-когерентный вейвлетный анализ. Сплошные линии отделяют область влияния краевых эффектов. Жирные линии ограничивают области, где вейвлет-когерентность отлична от нуля на уровне значимости $p=0,05$. Стрелки показывают соотношение между фазами временных рядов: вправо – в фазе, влево – в противофазе, вниз – вариации BS опережают вариации V86 на 90°, вверх – отстают на 90°

длиннопериодные колебания. Высокая степень синхронизации колебаний с коэффициентом корреляции, близким к единице, заметна для квазидвухлетних колебаний, а также вариаций с периодами более 70 месяцев, однако для более длиннопериодных вариаций влияние краевых эффектов ограничивает надежность результатов анализа. Следует отметить, что наряду с интервалами с высокой когерентностью отмечаются интервалы ослабления и даже отсутствия значимой взаимосвязи. Низкая когерентность в промежуточной области между годовым колебанием и квазидвухлетними колебаниями, вероятно, связана с тем, что период этих колебаний близок к периоду годовой гармоники, кроме того, часть колебаний в этой области, возможно, проявляется как результат биений между годовой гармоникой и длиннопериодными колебаниями (Вишератин и др., 2006). Рассогласование фаз наблюдается также для области периодов 50-70 месяцев. Причины этого рассогласования неясны, отметим здесь, что амплитуда этих колебаний невелика и, согласно работе (Вишератин, Кузнецов, 2012), распределение фаз колебаний в этой спектральной области изменчиво как в пространстве, так и во времени. В отличие от вейвлет-когерентного ана-

лиза, кросс-вейвлетный анализ позволяет выявить спектральные области, для которых значительна совместная мощность сигнала (Grinsted et al., 2004). Кросс-вейвлетные спектры (не приведены) показали, что области, для которых совместная мощность сигнала превышает уровень значимости $p=0,05$ (для модели, учитывающей автокоррелированность рядов или «красный шум»), ограничивается периодами, близкими периоду годовой гармоник. Вместе с тем, такие особенности вейвлет-когерентности (*рис. 2б*), как синхронизация колебаний вблизи квазидвухлетних и квазидесятилетних колебаний и опережение фазы годового колебания BS на 90° , сохраняются.

Основные выводы

Результаты анализа среднезональных и глобально-усредненных среднемесячных значений ОСО по данным V86 и BS показали, что в совпадающей широтной области 60° ю.ш. – 60° с.ш. относительные отклонения (V86-BS)/V86 между средними значениями сезонного хода для широтного пояса 55° ю.ш. – 60° с.ш. не превышают 2% и возрастают до 10% в более южных широтах. Величины среднезональных трендов BS в пределах погрешности совпадают с трендами, вычисленными для данных V86, а систематическое отклонение трендов или дрейф не превышает для большинства зон 0,1 еД/год. Сопоставление временных рядов, усредненных в интервалах 60° ю.ш. – 30° ю.ш., 30° ю.ш. – 30° с.ш., 30° с.ш. – 60° с.ш. и 60° ю.ш. – 60° с.ш., показало, что за весь период измерений различие в средних значениях ОСО во всех указанных широтных интервалах не превышает 1,6 еД или 0,6%, а коэффициенты корреляции временных рядов превышают 0,9. Фазовые соотношения как для короткопериодных вариаций, так и более длиннопериодных колебаний хорошо согласуются. Таким образом, база данных BS может быть рекомендована для анализа длиннопериодной изменчивости и трендов полей ОСО.

Анализ глобально-усредненных среднемесячных значений ОСО для широтного интервала 60° ю.ш. – 60° с.ш. (V86) и 90° ю.ш. – 90° с.ш. (BS) показал, что фаза годового колебания по данным BS опережает фазу годового колебания V86 примерно на 3 месяца, а амплитуда годового колебания BS примерно в два раза выше, чем по данным V86. В области длиннопериодных вариаций выделяются области периодов квазидвухлетних, квазидесятилетних и более длиннопериодных колебаний, для которых фазовые соотношения хорошо согласуются в течение всего анализируемого периода. Эти различия глобально-усредненных по данным BS и V86 рядов следует учитывать в различных модельных расчетах.

Авторы благодарны коллективам ученых NASA и Г. Бодекеру (Bodeker Scientific) за возможность доступа к созданным ими базам данных, а также анонимному рецензенту, замечания которого позволили значительно улучшить рукопись статьи.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 14-05-00127.

Литература

1. Вишератин К.Н., Каменоградский Н.Е., Кашин Ф.В., Семенов В.К., Синяков В.П., Сорокина Л.И. 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. Межгодовые вариации и тренды среднезональных рядов общего содержания озона, температуры и зонального ветра // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 4. С. 502–520.
3. Вишератин К.Н., Кузнецов В.И. Пространственно-временные вариации фазы основных колебаний общего содержания озона по данным спутниковых измерений TOMS-SBUV // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 192–199.
4. 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.
5. Bodeker G.E., Hassler B., Young P.J., Portmann R.W. A vertically resolved, global, gap-free ozone database for assessing or constraining global climate model simulation // Earth Syst. Sci. Data. 2013. Vol. 5. P. 31–43. DOI:10.5194/essd-5-31-2013.
6. Chehade W., Weber M., Burrows J.P. Total ozone trends and variability during 1979–2012 from merged datasets of various satellites // Atmos. Chem. Phys. 2014. Vol. 14. P. 7059–7074. DOI:10.5194/acp-14-7059-2014.
7. Frith S.M., Kramarova N.A., Stolarski R.S., McPeters R.D., Bhartia P.K., Labow G.J. Recent changes in total column ozone based on the SBUV Version 8.6 Merged Ozone Data Set // J. Geophys. Res. Atmos. 2014. Vol. 119. P. 9735–9751. DOI:10.1002/2014JD021889.
8. Grinsted A., Moore J.C., Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series // Nonlin. Processes Geophys. 2004. No. 11. P. 561–566.
9. Labow G.J., McPeters R.D., Bhartia P.K., Kramarova N. A comparison of 40 years of SBUV measurements of column ozone with data from the Dobson/Brewer network // J. Geophys. Res. Atmos. 2013. Vol. 118. P. 7370–7378. DOI:10.1002/jgrd.50503.
10. McPeters R.D., Bhartia P.K., Haffner D., Labow G.J., Flynn L. The version 8.6 SBUV ozone data record: An overview // J. Geophys. Res. Atmos. 2013. Vol. 118. P. 8032–8039. DOI:10.1002/jgrd.50597.
11. Stolarski R.S., Frith S.M. Search for evidence of trend slow-down in the long-term TOMS/SBUV total ozone data record: the importance of instrument drift uncertainty // Atmos. Chem. Phys. 2006. Vol. 6. P. 4057–4065.

Basic characteristics of total ozone global field variability from merged databases comparison

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

¹*Institute of Experimental Meteorology of RPA Typhoon, Obninsk 249038, Russia*

E-mail: kvisher@rpatyphoon.ru

²*Institute for Nuclear Power Engineering of NRNU MEPhI*

Obninsk 249040, Russia

E-mail: kuznetsov48@list.ru

Spatial and time variability of global and zonal average total ozone (TO) fields are analyzed based on satellite data from databases SBUV Merged Total And Profile Ozone Data, Version 8.6 (V86) for area 60°S – 60°N and Bodeker Scientific Combined Total Column Ozone Database (BS) for area 90°S – 90°N for 1979–2012. The relative deviations (V86-BS)/V86 for 60°S – 60°N between seasonal mean zonal means at 60°S – 60°N do not exceed 3%. Values of the linear trends are close to zero near to equator. Maximum negative trends are observed close to (50–60)°S and reach -0.6 DU/year. The zonal mean trends for BS coincide with the trends calculated for V86 in limits of an error, and the systematic deviation of trends or a drift does not exceed 0.1 DU/year for the majority of zonal bands. Phases of short-period and long-period oscillations are well agreed. For globally – averaged monthly mean TO values for 60°S – 60°N (V86) and 90°S – 90°N (BS), the phase of annual oscillation for BS is ahead of that for V86 by approximately three months. The BS and V86 phase relations agree well enough for quasi-biennial oscillations and oscillations with periods more than 70 months.

Keywords: total ozone, spatio-temporal variations, trends, cross-wavelet analysis, satellite data

Accepted: 08.04.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-165-172

References

1. Visheratin K.N., Kamenogradskii N.E., Kashin F.V., Semenov V.K., Sinyakov V.P., Sorokina L.I., Spectral-Temporal Structure of Variations in the Atmospheric Total Ozone in Central Eurasia, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2006, Vol. 42, No. 2, pp. 184–202.
2. Visheratin K.N., Interannual variations and trends in zonal mean series of total ozone, temperature, and zonal wind, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2007, Vol. 43, No. 4, pp. 461–479.
3. Visheratin K.N., Kuznetsov V.V., Prostranstvenno-vremennye variatsii fazy osnovnykh kolebaniy obchego soderzhaniya ozona po dannym sputnikovym izmereniy TOMS-SBUV (Spatio-temporal variations of phase of basic oscillation of total ozone on basis of satellite measurements TOMS-SBUV), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 192–199.
4. Visheratin K.N., Relationship between phases of quasidecadal oscillations of total ozone and 11-year solar cycle, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2012, Vol. 52, No. 1, pp. 94–102.
5. Bodeker G.E., Hassler B., Young P.J., Portmann R.W., A vertically resolved, global, gap-free ozone database for assessing or constraining global climate model simulation, *Earth Syst. Sci. Data*, 2013, Vol. 5, pp. 31–43. DOI:10.5194/essd-5-31-2013.
6. Chehade W., Weber M., Burrows J.P., Total ozone trends and variability during 1979–2012 from merged datasets of various satellites, *Atmos. Chem. Phys.*, 2014, Vol. 14, pp. 7059–7074. DOI:10.5194/acp-14-7059-2014.
7. Frith S.M., Kramarova N.A., Stolarski R.S., McPeters R.D., Bhartia P.K., Labow G.J., Recent changes in total column ozone based on the SBUV Version 8.6 Merged Ozone Data Set, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2014, Vol. 119, pp. 9735–9751. DOI:10.1002/2014JD021889.
8. Grinsted A., Moore J.C., Jevrejeva S., Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series, *Nonlin. Processes Geophys.*, 2004, No. 11, pp. 561–566.
9. Labow G.J., McPeters R.D., Bhartia P.K., Kramarova N., A comparison of 40 years of SBUV measurements of column ozone with data from the Dobson/Brewer network, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2013, Vol. 118, pp. 7370–7378. DOI:10.1002/jgrd.50503.
10. McPeters R.D., Bhartia P.K., Haffner D., Labow G.J., Flynn L., The version 8.6 SBUV ozone data record: An overview, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2013, Vol. 118, pp. 8032–8039. DOI:10.1002/jgrd.50597.
11. Stolarski R.S., Frith S.M., Search for evidence of trend slow-down in the long-term TOMS/SBUV total ozone data record: the importance of instrument drift uncertainty, *Atmos. Chem. Phys.*, 2006, Vol. 6, pp. 4057–4065.