ВРЕМЕННА́Я ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В АЗИАТСКОМ РЕГИОНЕ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2017 г. К. Н. Вишератин^{1,} *, А. Ф. Нерушев¹, М. Д. Орозалиев², X. Zheng³, Sh. Sun⁴, L. Liu⁴

¹ΦГБУ "Научно-производственное объединение Тайфун", Обнинск, Россия ²Кыргызский государственный национальный университет, Бишкек, Кыргызская Республика ³Китайская академия метеорологических наук, Пекин, Китай ⁴Институт информационных технологий, Ченгду, Китай *E-mail: kvisher@rpatyphoon.ru Поступила в редакцию 02.10.2015 г.

Приведены результаты исследования временной изменчивости общего содержания озона (OCO) в регионе, охватывающем горные массивы Средней Азии и Тибетское плато, традиционными методами, а также методами спектрального, кросс-вейвлетного и композитного анализов. Использованы данные наземных станций наблюдения Хиангхе, Кунминг и Иссык-Куль, а также данные спутниковых измерений SBUV/SBUV2 (SBUV merged total and profile ozone data, Vers. 8.6) за 1980–2013 гг., OMI (Ozone Monitoring Instrument) и TOU (Total Ozone Unit) за 2009–2013 гг. Среднее относительное отклонение от данных SBUV/SBUV2 для ст. Кунминг и Иссык-Куль за период 1980–2013 гг. менее 1%, для ст. Хиангхе характерно превышение данных спутниковых измерений над наземными при среднем отклонении 2%. Результаты Фурье-анализа показали, что распределение амплитуд и периодов колебаний ОСО в области более 14 мес. очень схоже для всех анализируемых рядов. Вместе с тем по результатам кросс-вейвлетного и композитного анализа, фазовые соотношения между рядами могут испытывать значительные отличия, особенно в области периодов 5–7 лет. Фаза квазидесятилетних колебаний для ст. Кунминг близка к фазе колебаний 11-летнего солнечного цикла, для ст. Хиангхе и Иссык-Куль вариации ОСО опережают вариации солнечного цикла.

Ключевые слова: общее содержание озона, временная изменчивость, наземные и спутниковые измерения, Азиатский регион, спектральный, кросс-вейвлетный и композитный анализ **DOI:** 10.7868/S0205961417010080

введение

Пространственное распределение и временная изменчивость общего содержания озона (ОСО) и обуславливающие их причины на протяжении многих лет являются актуальной проблемой физики атмосферы. Для ее решения используются различные методы измерений с помощью наземной и спутниковой аппаратуры, а также методы статистического анализа и математического моделирования. С развитием техники космических наблюдений все больший удельный вес приходится на данные измерений характеристик атмосферного озона с помощью спутниковых приборов различного типа (Тимофеев, 2010).

Проблеме изменчивости ОСО на разных временны́х масштабах посвящено большое количество работ как по данным наземных, так и спутниковых измерений (см., например, (Labow et al., 2013; Chehade et al., 2014; WMO, 2014)) и многочисленную библиографию в них). Вопросы сравнения данных измерений ОСО с помощью наземной и спутниковой аппаратуры различного типа детально исследованы в работе (Fioletov et al., 2008; Labow et al., 2013). В недавней работе (Израэль и др., 2014) изучены причины расхождения данных измерений ОСО наземными приборами УФ- и видимого диапазонов (спектральные приборы Добсона, Брюера и французский спектрометр SAOZ, а также российские фильтровые приборы М-124) и надирными сканирующими приборами космического базирования. Обнаружены значительные расхождения в линейных трендах ОСО даже при их вычислении по данным измерений двух расположенных в одной точке наземных приборов.

Значительный интерес представляют вариации ОСО над обширными горными районами, в частности, мощными горными системами Средней и Центральной Азии (Гималаи, Тань-Шань, Памиро-Алай, Тибет). Горные системы оказывают заметное воздействие на характеристики струйных течений, одного из важнейших факторов, определяющих пространственно-временну́ю изменчивость ОСО. Влияние мощных горных систем распространяется на высоты, в 3—4 раза превышающие высоту гор. Над горными системами Средней и Центральной Азии, ориентация которых в целом совпадает с направлением западных ветров, даже возникают локальные орографически обусловленные струйные течения. Их возникновение вызвано резкими различиями характеристик воздушных масс над равнинными и горными территориями, особенно на границе между ними. Горные системы и Тибетское плато, нагреваясь летом и выхолаживаясь зимой, формируют местные особенности циркуляции (Атмосфера..., 1991).

Наземные станции мониторинга ОСО в этом районе немногочисленны. Долговременные непрерывные измерения ОСО проводились с 1979 г. в северо-западной части региона на ст. Иссык-Куль, на ст. Хиангхе вблизи Пекина и с 1980 г. на ст. Кунминг на юго-востоке Китая. С 1990 г. дополнительно были начаты наблюдения на четырех станциях, и в том числе на ст. Лхаса на Тибетском плато. Интересной особенностью наблюдений на этих станциях является достаточно резкая широтная изменчивость ОСО, с высокими значениями ОСО на станциях, расположенных в северной части региона и относительно низкими величинами ОСО на юге и над Тибетским плато (Zhou et al., 1995; Вишератин и др., 2006; Bian et al., 2011). Области пониженных значений ОСО над Тибетским плато, особенно в летнее время, объясняются в основном влиянием конвективных потоков (Zhou et al., 1995; Bian et al., 2011). Другой возможной причиной широтной изменчивости ОСО, на наш взгляд, может быть упомянутая выше особенность атмосферной циркуляции, в том числе присутствие высотных струйных течений.

Настоящая работа посвящена исследованию временной изменчивости ОСО в азиатском регионе на основе сопоставления данных наиболее длительных измерений на наземных станциях мониторинга ОСО и спутниковых измерений приборами SBUV/SBUV2, ОМІ и ТОU. Традиционные методы статистического и спектрального анализа дополнены методами композитного и кросс-вейвлетного анализов.

ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ДАННЫХ

Кратко опишем использованные для анализа наземные и спутниковые данные измерений и инструменты, с помощью которых они получены.

В работе использованы среднемесячные значения ОСО за 1980–2013 гг., полученные на трех станциях наблюдения, входящих в мировую озонометрическую сеть (WOUDC, 2013). Станции Хуанхе (№ 208), Кунминг (№ 209) и Иссык-Куль (№ 347) находятся на расстоянии около 3 тыс. км друг от друга и охватывают значительную часть

горных систем Средней Азии и Тибетское плато (рис. 1).

Станция Хуанхе (№ 208) находится вблизи Пекина (39.9° с.ш., 117.0° в.д., 50 м над уровнем моря); ст. Кунминг (№ 209) – на юго-востоке Китая (25.0° с.ш., 102.7° в.д., 1920 м над уровнем моря), в субтропической горной местности. Измерения на ст. Хиангхе и Кунминг проводятся с помощью приборов Dobson № 075 и Dobson № 003 соответственно. Оба прибора периодически калибруются с региональным стандартом – прибором Dobson № 116, Japanese Meteorological Agency (JMA). Станция Иссык-Куль (№ 347) расположена на северном берегу высокогорного оз. Иссык-Куль (Кыргызстан) (42.6° с.ш., 77.0° в.д., 1650 м нал уровнем моря). Измерения ОСО проводятся на спектрофотометрической установке (СФСУ) многоволновым методом (Семенов и др., 1983). Случайная погрешность единичного измерения ОСО составляет 0.6%. Для определения систематической погрешности измерений ОСО на установке СФСУ проводились сверочные измерения со спектрофотометрами Добсона № 108 (Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова) и Брюера № 44 (НПО "Тайфун"). Систематические отклонения результатов измерений ОСО на установке СФСУ и спектрофотометров Добсона № 108 и Брюера № 44 не превышают 2% (Вишератин и др., 2006).

Данные спутниковых измерений над точками с координатами наземных озонометрических станций были сформированы на основе нескольких баз данных. До недавнего времени при анализе пространственно-временных вариаций ОСО наиболее часто использовались базы данных спутниковых измерений на основе приборов TOMS, OMI, а также объединенная база данных, дополненная измерениями на аппаратуре SBUV/SBUV2 – TOMS-SBUV merged total ozone data (см., например, (Fioletov et al., 2008; Вишера-тин, Кузнецов, 2012; Chehade et al., 2013)). Однако последняя версия объединенной базы данных вышла в 2011 г. (Vers. 8), и с тех пор не обновлялась. Поэтому нами были использованы рекомендованные в (Labow et al., 2013; McPeters et al., 2013) данные, основанные на измерениях аппаратурой SBUV/SBUV2 (SBUV merged total and profile ozone data, Vers. 8.6). Следует отметить, что одной из причин рекомендаций (Labow et al., 2013; McPeters et al., 2013) является систематическое смещение между данными прибора EP-TOMS и функционирующего в настоящее время прибора ОМІ, объяснения которому пока не найдено. Поэтому представляет интерес сопоставление с данными китайского прибора TOU (Total Ozone Unit) на борту спутника FengYun-3/A (Wang et al., 2010, 2012; Bai et al., 2013).

В настоящей работе использовались значения ОСО над точками с географическими координатами наземных станций (overpass data), содержащиеся в базе данных SBUV merged total and profile



Рис. 1. Расположение наземных станций наблюдения: 208 – Хиангхе; 209 – Кунминг; 347 – Иссык-Куль.

ozone data, Vers. 8.6 (далее V86) (ftp://toms.gsfc.nasa./ pub/sbuv/MERGED) за период 1980–2013 гг., данные OMI (http://avdc.gsfc.nasa.gov) за период 2009–2013 гг. и данные TOU за период 2009–2013 гг. (http://satellite.cma.gov.cn).

Как наземные, так и спутниковые данные имеют незначительные пропуски в измерениях. Поэтому предварительно такие пропуски были заполнены. Для этого из рядов был вычтен линейный тренд, а с помощью Фурье-анализа были определены параметры годовой и полугодовой гармоник. Амплитуда и фаза анализируемых рядов представлены в табл. 1.

Приведенные в табл. 1 параметры колебаний значимы в пределах 1 сигма. Величины тренда S0 и В (в еД/декаду) были рассчитаны по среднегодовым данным и для всех рядов незначимы. Общее выражение, аппроксимирующее годовую и полугодовую составляющие колебаний ОСО, имеет следующий вид:

$$Y = S0 + B/120N + A12\sin(P12 + 2\pi N/12) + A6\sin(P6 + 2\pi N/6),$$
(1)

где A12 и A6 — амплитуды (еД); P12 и P6 — фазы годовой и полугодовой гармоник (радианы); S0 (еД) и В (еД/декада) — параметры тренда; *N* — порядковый номер месяца, начиная с января 1980 г.

Рассчитанные по (1) значения ОСО были добавлены вместо пропусков в исходные ряды. Дополнительные расчеты с включением гармоник с периодом 3 и 4 мес. показали незначительное отличие. В табл. 1 и далее по тексте статьи для краткости данные наземных станций обозначены номерами станций с добавлением буквы G (ground), а спутниковые данные — номерами станций с добавлением буквы S (satellite). Следует отметить, что, при достаточно хорошем согласии наземных и спутниковых параметров, для ст. Хиангхе (208) значительно отличаются фазы полугодовой гармоники, и для всех станций имеются различия в величине тренда.

Таблица 1. Параметры формулы (1) по данным наземных и спутниковых измерений ОСО за период 1980–2013 гг.

Станция	A12	P12	A6	P6	S 0	B*120
G208	37.6	-0.04	0.6	2.65	338.9	-0.2
S208	39.7	0.12	0.7	1.45	335.3	-2.2
G209	19.8	-1.58	3.8	-2.27	263.4	1.2
S209	17.8	-1.40	4.8	-2.37	266.4	0.4
G347	31.7	-0.01	7.2	-0.32	334.4	-7.9
S347	33.4	-0.08	6.5	-0.42	325.9	-3.1



Рис. 2. Относительное отклонение Δ (%) между наземными и спутниковыми (V86) измерениями ОСО за период 1980–2013 гг.: *а* – ст. Хиангхе (208); *б* – ст. Кунминг (209); *в* – ст. Иссык-Куль (347).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Один из традиционных методов сопоставления наземных и спутниковых данных (Fioletov et al., 2008, Bai et al., 2013) заключается в вычислениях относительного отклонения (Δ)

$$\Delta = (G(i) - S(i))/G(i).$$
(2)

Значения относительного отклонения приведены на рис. 2.

Для ст. 208 характерно некоторое превышение данных наземных измерений над спутниковыми при среднем значении Δ за весь период около 2%. Отметим, что для этой станции систематическое смещение результатов было отмечено и при сопоставлении с данными SCIAMACHY и ОМІ в работе (Zheng, Wei, 2010). Для ст. 209 и 347 среднее значение Δ за весь период менее 1%, при этом обращает на себя внимание занижение результатов ст. 347 в период с 2000 по 2011 гг. Причины такого хода ОСО на ст. 347 требуют дополнительного исследования. Линейный тренд отклонений между наземными и спутниковыми измерениями наибольший для ст. 208, однако, как и для двух других станций, незначим. В целом данные наземных и спутниковых измерений для всех трех станций достаточно хорошо согласуются.

Как уже упоминалось, анализ данных TOMS и OMI, проведенный в работе (Labow et al., 2013), показал, что наблюдается систематическое расхождение (данные OMI ниже данных TOMS), что послужило причиной рекомендаций для использования данных SBUV/SBUV2.

На рис. 3 показаны результаты сопоставления наземных данных с данными V86, ОМІ и TOU за 2009–2013 гг. Для ст. 208 данные V86, ОМІ и ТОU хорошо согласуются между собой, при этом спутниковые значения в среднем за весь период на 2.7, 2.5 и 1.6% соответственно ниже наземных. Для ст. 209 систематическое занижение спутниковых данных наблюдается только для прибора OMI и составляет 2%. Данные V86 и TOU согласуются между собой и с данными ст. 209 в пределах 1%. Для ст. 347 можно выделить период до 2011 г., когда спутниковые данные были в среднем выше наземных. Начиная с 2011 г., спутниковые данные хорошо согласуются между собой и за весь период в среднем превышают данные станции 347 на 2%. Следует отметить также следующую общую тенденцию, отчетливо наблюдаемую для ст. 208 и 209: наибольшие отличия от данных наземных измерений, достигающие (5-7)%, отмечены в летнее время.

В целом данные SBUV/SBUV2, OMI, TOU достаточно хорошо согласуются между собой над ст. 347 и 208, расположенными в северной части рассматриваемого региона. Над ст. 209, расположенной на юго-востоке в гористой местности, результаты измерений прибором OMI занижены в среднем на 2–3%.

Рассмотрим более детально сравнение данных наземных и спутниковых измерений, применив для этого методы спектрального, кросс-вейвлетного и композитного анализов.

Спектральный анализ проводился с помощью модифицированного Фурье преобразования Ломба-Скаржла (ЛС) (Scargle, 1982), который имеет ряд преимуществ в сравнении с другими методами спектрального анализа. Предварительно из данных был удален линейный тренд. Значимость спектральных гармоник (пиков) в полученных спектрах оценивалась по методике (Scargle, 1982; Baluev, 2008). Поскольку амплитуды годовой гармоники в 6-10 раз превосходят амплитуды более длиннопериодных колебаний, предварительно временные ряды "отбеливались", т.е. исключались колебания с периодами от 3 до 13 мес. (годовое колебание и его гармоники). Алгоритмы вычислений различными спектральными методами более подробно изложены в (Вишератин, Карманов, 2008).

Результаты спектрального анализа отдельно для наземных и спутниковых данных представлены на рис. 4. Для лучшей различимости отдельно показаны спектры в области 14—30 и 30—150 мес. Хотя для ст. 209 амплитуда годовой гармоники почти в 2 раза ниже, чем для расположенных в северной части региона ст. 208 и 347 (табл. 1), амплитуды колебаний с периодами более 14 мес.



Рис. 3. Относительное отклонение Δ (%) между наземными и спутниковыми (V86, OMI, TOU) измерениями ОСО за период 2009–2013 гг., ст.: *a* – Хиангхе; *б* – Кунминг 4; *в* – Иссык-Куль.

близки к амплитудам колебаний для ст. 208 и 347. Спектральная структура спутниковых и наземных данных как для основных, значимых на уровне 0.05, колебаний, так и ряда других колебаний близко совпадает. Распределение амплитуд и периодов колебаний в области более 14 мес. очень схоже для всех анализируемых рядов. В табл. 2 для примера приведены минимальные и максимальные периоды основных колебаний над тремя рассматриваемыми станциями, а также средние амплитуды этих колебаний.

На рис. 4 обращают на себя внимание два стабильных колебания с периодами около 21 и 28 мес. Колебания с периодом вблизи 28 мес. (квазидвухлетние колебания, КДК) обычно связывают с вариациями экваториального стратосферного ветра (Gray, Pyle, 1989). Диапазон, к которому можно отнести квазидвухлетние колебания в ОСО, ограничен периодами от 24–25 до 35–36 мес., так как только для таких колебаний характерны резкие максимумы точно над экватором и симметрич-

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА № 1 2017

ные минимумы вблизи $(10-12)^{\circ}$ S и $(10-12)^{\circ}$ N. Для экваториальной области наиболее интенсивны колебания с периодами 28–29 и 32–33 мес., а в обоих полушариях вблизи 40°–50° наблюдаются максимумы внетропических квазидвухлетних колебаний (Вишератин, Кузнецов, 2012).

В работе (Bohme, 1965) было предположено, что биения между основными частотами могут приводить к возникновению колебаний на комбинационных частотах. В (Tung, Yang, 1994) рассмотрена возможность модуляции КДК ОСО циркуляционными процессами с периодом, равным периоду годовой гармоники. Мультипликативная модель модуляции, предложенная в этой работе, может быть представлена следующим образом:

$$\begin{bmatrix} A + B\sin\left(\frac{2\pi t}{T_{12}}\right) \end{bmatrix} \sin\left(\frac{2\pi t}{T_{QBO}}\right) =$$

$$= A\sin\left(\frac{2\pi t}{T_{QBO}}\right) + \frac{B}{2}\sin\left(\frac{2\pi t}{T_{-}}\right) + \frac{B}{2}\cos\left(\frac{2\pi t}{T_{+}}\right),$$
(3)



Рис. 4. Спектральные амплитуды ОСО по данным наземных измерений: a - G208, e - G209, d - G347 и по спутниковым данным: $\delta - S208$, e - S209, e - S347. Горизонтальные прямые линии соответствуют доверительной вероятности 95%.

где А и В – постоянная и переменная части годового колебания T_{12} ; T_{QBO} – период КДК; T и T_+ – периоды колебаний, соответствующие разности и сумме исходных частот T_{12} и T_{QBO} . Для данных из табл. 2 можно получить $T_- = 1/(1/12 - 1/28) = 21$ мес. и $T_+ = 1/(1/12 + 1/28) = 8.4$ мес. Аналогично модуляция колебания с периодом около 35 мес. приводит к появлению колебаний с периодами 8.9 и 18.2 мес. Колебания с близкими периодами присутствуют в рассматриваемых спектрах, однако амплитуды этих колебаний существенно меньше величины B/2. Аналогичным образом может быть построена аддитивная мо-

дель модуляции (Kiefer, 2015). В этом случае комбинационные частоты, возникающие при сложении колебаний, имеют удвоенные в сравнении с (3) значения периодов. Недостаток подобных интерпретаций в отсутствии или недостаточной обоснованности физических механизмов, создающих условия для возникновения той или иной комбинационной частоты.

В спектре ОСО присутствуют также ряд колебаний в области 4—5 и 8—13 лет, которые в литературе обычно связывают с явлением Эль—Ниньо и 11-летним циклом солнечной активности (СА). Для более подробного анализа этих колебаний

Таблица 2. Основные периоды (T_{\min} , T_{\max} в мес.) и средние амплитуды (А, еД) колебаний над ст. 208, 209, 347 по спутниковым данным

T _{min}	120.0	89.0	58.0	45.0	34.7	31.0	27.2	22.8	20.9	18.3	15.0	14.3
$T_{\rm max}$	125.0	90.0	59.0	49.0	36.3	31.7	28.1	23.2	21.3	18.6	15.4	14.4
Α	2.9	2.9	2.3	2.4	2.4	1.7	3.5	3.1	3.4	1.9	2.4	2.4



Рис. 5. *а* – Кросс-корреляционный вейвлетный анализ рядов общего озона по наземным и спутниковым данным для ст. 208, Хиангхе. Степень коррелированности (цветовая шкала) дана в отн. ед. Жирной черной линией обведены области с доверительным интервалом более 95%. Стрелки показывают соотношение между фазами временны́х рядов: вправо – в фазе, влево – в противофазе, вниз – вариации G208 опережают S208 на 90°, вверх – отстают на 90°; δ – композитные ряды на основе наземных (*1*) и спутниковых (*2*) данных в области 8–13 лет и вариации солнечной активности (*3*).

используем методы вейвлетного и композитного анализа.

В работах (Torrence, Compo, 1998; Grinsted et al., 2004) был предложен метод кросс-вейвлетного преобразования для совместного анализа двух временны́х рядов. Этот метод дает возможность определить степень корреляции и фазовые соотношения между двумя рядами на частотно-временно́м пространстве, а также оценить методом Монте-Карло значимость корреляционных соотношений с учетом процессов красного шума (автокоррелированности рядов). На рис. 5а показаны результаты кросс-вейвлетного анализа для рядов ОСО по наземным и спутниковым данным для станции 208. Так же, как и при спектральном анализе, предварительно из временны́х рядов были исключены линейный тренд и сезонный ход.

Из рис. 5*a* следует, что межгодовые колебания ОСО для значительной части периодов и во времени происходят в одной фазе. Вместе с тем для периодов более 90 мес. в последнее десятилетие максимумы колебаний озона по наземным измерениям стали опережать максимумы колебаний по спутниковым данным, а для периодов более 140 мес. колебания близки к противофазным. Этим длиннопериодным вариациям общего содержания озона на приведенных на рис. 4 спектрах соответствуют пики с периодами вблизи 90 и 120 мес. На рис. 6*a* и 7*a* показаны результаты кроссвейвлетного преобразования для ст. 209 и 347.

Для этих станций фазовые соотношения между спутниковыми и наземными данными в области длиннопериодных колебаний достаточно хорошо согласуются. Вместе с тем, в отдельные интервалы времени наблюдаются отличия между спутниковыми и наземными данными в области квазипятилетних колебаний (4—6 лет). Вариации озона и других параметров атмосферы с такими периодами обычно связывают с крупномасштабными процессами в Тихом океане — явлениями Эль-Ниньо и Ла-Ниньа и трансформацией центров действия атмосферы (Нерушев, 2003). Фазовые отличия наиболее заметны для расположенной на юге рассматриваемого региона станции 209. Для этой станции в период с 1987 по 2005 гг. вариации ОСО в области 4—6 лет по спутниковым и наземным данным были близки к противофазным.

Для оценки фазовых соотношений в области квазидесятилетних вариаций (КДВ) дополнительно был использован композитный метод, позволяющий отфильтровывать колебания в выделенных участках спектра (Вишератин, 2012). Чтобы сформировать композитные временные ряды, на первом этапе вычислялись коэффициенты прямого Фурье-преобразования (ФП), а на втором этапе с помощью обратного ФП формировались временные ряды (рис. 56-76), содержащие сумму гармоник в интервале от 8 до 13 лет. Полученные композитным методом фазовые соотношения между наземными и спутниковыми данными для ст. 208 достаточно хорошо согласуются с данными кросс-вейвлетного анализа (рис. 5а) и подтверждают с помощью независимого метода наличие рассогласованности в фазах КДВ ОСО. Причины такого расхождения неясны.



Рис. 6. То же, что и на рис. 5, для ст. 209, Кунминг.



Рис. 7. То же, что и на рис. 5, для ст. 347, Иссык-Куль.

Интересно сопоставить квазидесятилетние вариации ОСО с 11-летним циклом солнечной активности (СА). Фазовые соотношения между КДВ ОСО и 11-летним циклом СА ранее обсуждались на примере наиболее длинного озонового ряда (ст. Ароза, Швейцария) и среднезональных полей ОСО в (Вишератин, 2012; Visheratin, 2015). В этих работах было показано, что фаза максимумов КДВ ОСО в тропиках совпадает с фазой максимумов СА, а в средних широтах Северного полушария опережает максимумы солнечной активности. Из рис. 56 следует, что в 23 цикле

ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ

ным ст. 208 стали опережать вариации СА, а в текущем 24 цикле колебания близки к противофазе. Для ст. 347 вариации озона в среднем также опережают вариации СА, что лучше заметно при сопоставлении минимумов вариаций. Для ст. 209, расположенной южнее, фаза квазидесятилетних вариаций ОСО близка к фазе 11-летнего цикла солнечной активности.

солнечной активности колебания озона по дан-

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проанализированы данные спутниковых и наземных измерений общего содержания озона в регионе, охватывающем горные массивы Средней Азии и Тибетское плато, традиционными методами, а также методами спектрального, кросс-вейвлетного и композитного анализа. Среднее относительное отклонение от данных SBUV/SBUV2 для ст. Кунминг (209) и Иссык-Куль (347) за период 1980-2013 гг. менее 1%, для ст. Хиангхе (208) характерно превышение данных спутниковых измерений над наземными при среднем отклонении 2%. Сопоставление спутниковых данных SBUV/SBUV2, ОМІ и ТОU за более короткий интервал, с 2009 по 2013 гг., показало, что в целом результаты измерений согласуются в пределах 3%. При этом данные ТОU согласуются в пределах 1% с данными SBUV/SBUV2.

Сопоставление спутниковых и наземных данных методами спектрального, кросс-вейвлетного и композитного анализа дало возможность оценить систематические сдвиги между анализируемыми данными на частотно-временной плоскости и, кроме того, оценить фазовые соотношения между анализируемыми рядами. Достаточно интересным представляется схожесть спектральной структуры межгодовых вариаций для станций, расположенных на значительном удалении друг от друга и разделенных мощными горными массивами. Одним из возможных факторов синхронизации колебаний и формирования пространственно-временной изменчивости ОСО могут служить характерные для данного региона струйные течения (Атмосфера..., 1991). Вместе с тем данные кросс-вейвлетного и композитного анализа показали, что при небольшом относительном отклонении спутниковых и наземных данных и схожести спектральной структуры, фазовые соотношения между рядами могут испытывать значительные отличия. Например, для ст. 209 фазы колебаний в области 5-7 лет в 1990-2000 гг. примерно противоположны. Фазовые соотношения между 11-летним циклом солнечной активности и вариациями озона по спутниковым и наземным данным, для станций, расположенных на севере и юге, отличаются. Если фаза колебаний для ст. Кунминг близка к фазе колебаний 11-летнего солнечного цикла, то для ст. Хиангхе и Иссык-Куль вариации ОСО опережают вариации солнечного цикла.

Авторы благодарны коллективам ученых NASA, NOAA, WOUDC, SIDC за возможность доступа к созданным ими базам данных. Работа выполнена в рамках проекта 1.3 программы сотрудничества между Росгидрометом и Китайским метеорологическим управлением при частичной поддержке РФФИ, проекты №№ 14-05-00127, 14-05-90104.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атмосфера: Справ. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 509 с. Вишератин К.Н., Каменоградский Н.Е., Кашин Ф.В., Семенов В.К., Синяков В.П., Сорокина Л.И. Спектральновременная структура вариаций общего содержания озона в атмосфере центральной части Евразии / Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 2. C. 205-223.

Вишератин К.Н., Кузнецов В.И. Пространственно-временные вариации фазы основных колебаний общего содержания озона по данным спутниковых измерений TOMS-SBUV // Совр. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 192-199.

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.

Израэль Ю.А., Белокриницкая Л.М., Дворецкая И.В., Дорохов В.М., Иванов К.А., Крученицкий Г.М., Шепелёв Д.В., Юсипов Т.А. Сравнение наземных и спутниковых измерений общего содержания озона // Метеорол. и гидрол. 2014. № 6. С. 85-98.

Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990.

Нерушев А.Ф. Воздействие интенсивных атмосферных вихрей на озоновый слой Земли. СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. 223 с.

Семенов В.К., Спекторов Л.А., Тимофеева С.С. Вариации общего содержания озона в районе озера Иссык-Куль // Атм. озон. М.: Наука, 1983. С. 85–88.

Тимофеев Ю.М. Глобальная система мониторинга параметров атмосферы и поверхности. СПб., 2010. 129 с. Bai K., Liu Ch., Shi R., Zhang Y., Gao W. Global validation of FY-3A total ozone unit (TOU) total ozone columns using ground-based Brewer and Dobson measurements // Int. J. Rem. Sens. 2013. V. 34. № 14. P. 5228-5242.

Baluev R.V. Assessing statistical significance of periodogram peaks // Mon. Not. Roy. Astr. Soc. 2008. V. 385. Iss. 3. P. 1279–1285.

Bian J.C., Yan R.C., Chen H.B., Lu D., Massie S.T. Formation of the summertime ozone valley over the Tibetan Plateau: The Asian summer monsoon and air column variations // Adv. Atmos. Sci. 2011. V. 28. № 6. P. 1318–1325. doi 10.1007/s00376-011-0174-9

Bohme W. A change of circulation pattern in middle latitudes in connection with the 26-month cycle // Tp. Mexдун. симп. "Динамика крупномасштабных атмосферных процессов". М.: Наука, 1965. С. 402-409.

Chehade W., Weber M., Burrows J.P. Total ozone trends and variability during 1979-2012 from merged datasets of various satellites // Atm. Chem. Phys. 2014. V. 14(13). P. 7059-7074. doi 10.5194/acp-14-7059-2014

Echer E. Multi-resolution analysis of global total ozone column // Ann. Geophys. 2004. V. 22. P. 1487-1493.

Ermolli I., Matthes K., Dudok de Wit T., Krivova N.A., Tourpali K., Weber M., Unruh Y.C., Gray L., Langematz U., *Pilewskie P., Rozanov E., Schmutz W., Shapiro A., Solanki S.K., Woods T.N.* Recent variability of the solar spectral irradiance and its impact on climate modelling //Atm. Chem. Phys. 2013. V. 13 P. 3945–3977. doi 10.5194/acp-13-3945-2013

Fioletov V.E., Labow G.J., Evans R., Hare E.W., Kohler U., McElroy C.T., Miyagawa K., Redondas A., Savastiouk V., Shalamyansky A.M., Staehelin J., Vanicek K., Weber M. Performance of the ground-based total ozone network assessed using satellite data // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. D14313. doi 10.1029/2008JD009809

Gray L.J., Pyle J.A. A two-dimensional model of the quasibiennial oscillation of ozone // J. Atm. Sci. 1989. V. 46. P. 203–220.

Grinsted A., Moore J.C., Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series // Nonlin. Proc. Geophys. 2004. № 11. P. 561–566. doi 10.5194/npg-11-561-2004

Kiefer R., Schad A., Herzberg W., Roth M. Determination of fundamental asteroseismic parameters using the Hilbert transform // Astron. & Astrophys. 2015. V. 578. № A56. doi 10.1051/0004-6361/201425474

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. Atm. 2013. V. 118. P. 7370–7378.

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. Atm. 2013. V. 118. P. 8032–8039.

SIDC-team, 2013. World Data Center for the Sunspot Index, Royal Observatory of Belgium, Monthly Report on the International Sunspot Number, (http://www.sidc.be/sunspot-data).

Scargle J.D. Studies in astronomical time series analysis. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // Astrophys. J. 1982. V. 263. P. 835–853.

Torrence C., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis // Bull. Am. Meteorol. Soc. 1998. V. 79. P. 61–78.

Tung K.K., Yang H. Global QBO in circulation and ozone. Pt. 1. Reexamination of observational evidence // J. Atm. Sci. 1994. V. 51. № 19. P. 2699–2707.

Visheratin K.N. Quasidecadal variations of global average and zonal mean values of total ozone and some parameters of the lower stratosphere // Proc. Int. Symp. "Atmospheric Radiation and Dynamics" (ISARD-2015), June 2015, Saint-Petersburg, Russia. P. 290.

Wang W., Zhang X., An X., Zhang Y., Huang F., Wang Y., Zhang Z. Lu J. Analysis for Retrieval and Validation Results of FY-3 Total Ozone Unit (TOU) // Chin. Sci. Bull. 2010. V. 55. P. 3037–3043.

Wang W., Flynn L., Zhang X., Wang Y., Jiang A., Zhang Y., Huang F., Li X., Liu R., Zheng Z., Yu W., Liuet G. Cross-Calibration of the Total Ozone Unit (TOU) with the Ozone Monitoring Instrument (OMI) and SBUV/2 for Environmental Applications // IEEE, Transact. Geosci. and Rem. Sens. 2012. V. 50. № 12. 2012. p/4043–4045.

WMO, 2014. World Meteorological Organization, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014. Global Ozone Research and Monitoring Project–Rep. № 55. 2014.

WOUDC, 2013. World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre operated by Environment Canada, Toronto, Ontario, Canada under the auspices of the World Meteorol. Organization.

Zhou X., Luo Ch., Li W. Atmospheric total ozone variation in China and anomalous low-value center of ozone over the Tibetan Plateau // Chin. Sci. Bull. 1995. V. 40(15). P. 1396–1398.

Zheng X., Wei X. Long-term total ozone comparisons between space and ground-based observations at sites of China // J. Appl. Meteorol. 2010. V. 21. № 1. P. 1–10.

Temporal Variability of Total Ozone in the Asian Region Inferred from Ground-Based and Satellite Measurement Data

K. N. Visheratin^a, A. F. Nerushev^a, M. D. Orozaliev^b, Zheng Xiangdong^c, Sun Shumen^d, Liu Li^d

^a Federal State Budgetary Institution "Research and Production Association "Typhoon", Obninsk, Russia ^bKyrghys State National University, Bishkek, Kyrghyzstan

^cChinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing, China

^dChengdu Institute of Information Technology, Chengdu, China

Results of analysis of temporal variability of total ozone (TO) in the region of mountainous zones of Middle Asia and Tibetian plateau obtain with traditional methods and the methods of spectral analysis, cross-wavelet and composite analyses are presented. The data of ground-based observation stations located at Huanghe, Kunming and the Issyk-Kul Lake along with the satellite data obtained at SBUV/SBUV2 (SBUV SBUV merged total and profile ozone data, Version 8.6) during 1980–2013, OMI (Ozone Monitoring Instrument) µ TOU (Total Ozone Unit) during 2009–2013 were used. A mean relative deviation from the data of SBUV/SBUV2 for the Kunming and Issyk-Kul for the period of 1980–2013 is less than 1%, for the Huanghe a typical excess of satellite data over the ground-based ones is registered at an average deviation of 2%. The results of the Fourier analysis have shown that the distribution of amplitudes and the periods of TOC oscillations within the range of over 14 months is similar for all the series analyzed. At the same time, according to the results of cross-wavelet and composite analyses the phase relationships between the series may considerably differ, especially in the periods of 5–7 years. The phase of quasi-decennial oscillations for the Kunming station is close to the 11-year oscillations of the solar cycle, for the Huanghe and Issyk-Kul stations the TO variations go ahead the solar cycle.

Keywords: total ozone content, temporal variability, ground-based and satellite measurements, Asian region, spectral, cross-wavelet and composite analyses