

УДК 551.510.534:551.590.21

ФАЗОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ КВАЗИДЕСЯТИЛЕТНИМИ КОЛЕБАНИЯМИ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА И 11-ЛЕТНИМ ЦИКЛОМ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2012 г. К. Н. Вишератин

*Институт Экспериментальной метеорологии ГУ НПО “Тайфун”,
г. Обнинск, Россия*

e-mail: kvisher@typhoon.obninsk.ru

Поступила в редакцию 02.06.2010 г.

После доработки 19.01.2011 г.

Проведен анализ изменчивости во времени фазовых соотношений между квазидесятилетними вариациями общего озона по данным ст. Ароза и международным индексом числа солнечных пятен R_i для периода 1932–2009 гг. До 1970-х годов фаза максимума квазидесятилетних вариаций озона отставала от вариаций солнечной активности примерно на 2.5–2.8 года, а в дальнейшем опережала примерно на 1.5 года. Сделано предположение, что в период с середины 60-х до середины 70-х годов квазидесятилетние колебания общего озона на средних широтах северного полушария были близки к резонансу с колебаниями солнечной активности, и сделана оценка характерного периода затухания квазидесятилетних колебаний общего озона. Глобальное распределение фаз и амплитуд квазидесятилетних колебаний общего озона изучалось для периода 1979–2008 гг. по данным спутниковых измерений. Фаза максимума квазидесятилетних колебаний общего озона наступает вначале в северных умеренных и высоких широтах и совпадает с окончанием фазы роста 11-летнего цикла солнечной активности. В тропиках фаза максимума колебаний отстает на 0.5–1 год. Максимальная задержка фазы вблизи 40–50°S достигает примерно 2-х лет. Дана аппроксимация широтного хода фазы квазидесятилетних вариаций общего озона.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для моделирования и прогнозирования изменчивости озонового слоя важно знание структуры и характерных особенностей длиннопериодных вариаций общего содержания озона (общий озон, ОСО) и, в частности, квазидесятилетних вариаций (КДВ) с периодами, близкими к 11-летней цикличности Солнца. Наличие таких вариаций и их связь с солнечной активностью обсуждались в большом числе публикаций (например, [Angell and Kogshover, 1973; Kane, 1988; Zerefos et al., 2009; Бекорюков и др., 2009; Вишератин, 2007а; Груздев и Брассер, 2007; Титова и др., 2009]). Следует отметить, что КДВ с периодами от 8 до 13 лет наблюдаются не только в общем содержании озона, но и во многих климатических и геофизических рядах (см. например, [Trenberth and Hurrelle, 1994; Rasporov et al., 2004; Calisesi et al., 2007; Wang et al., 2010]). Если для верхней стратосферы связь вариаций озона и УФ-излучения Солнца считается установленной, то для общего содержания озона, вопрос о том, связаны ли причины КДВ с собственными осцилляциями климатической системы Земли или с влиянием солнечной активности (СА) является одним из наиболее дискутируемых. Для моделирования и прогноза КДВ общего озона обычно используются модели множественной

линейной регрессии, в которых в качестве предиктора служат числа Вольфа, радио- или УФ-излучение (напр., [Stolarski et al., 1992; Fioletov et al., 2002; WMO, 2007]). Оценка вклада СА в изменчивость общего содержания озона по таким моделям для различных широтных зон составляет в среднем 2–4% [WMO, 2007]. Хотя значимая корреляционная связь между 11-летней солнечной цикличностью и КДВ общего озона отмечалась во многих публикациях, авторы некоторых работ высказывали предположение, что фазовые соотношения скорее всего имеют нелинейный характер и могут меняться как с течением времени, так и с широтой и долготой места наблюдения [Hill and Sheldon, 1975; Kane, 1988; Angell, 1989; Груздев и Брассер, 2007; Вишератин и др., 2008; Вишератин и Сизов, 2009].

В настоящей работе анализируется изменчивость фазовых соотношений между вариациями СА (международный индекс числа солнечных пятен) и вариациями общего озона в области периодов 8–13 лет для наиболее длинного ряда общего содержания озона, полученного на ст. Ароза, а также на основе спутниковых данных рассматриваются особенности пространственно-временного распределения амплитуды и фазы квазидесятилетних колебаний ОСО.

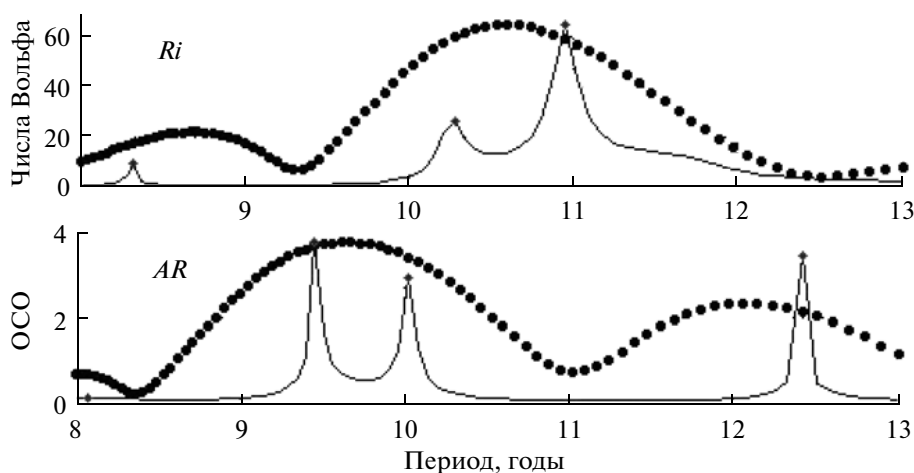


Рис. 1. Амплитудные спектры рядов чисел Вольфа Ri и общего озона AR за период 1932–2009 гг. методом максимальной энтропии Берга (тонкая кривая, амплитуда в отн. ед.) и методом Скаржля (кружки). Амплитуда ОСО в единицах Добсона (ЕД).

2. АНАЛИЗИРУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В расчетах использовался гомогенизированный временной ряд среднемесячных величин общего содержания озона с 1932 по 2006 гг., полученный на ст. Ароза, Швейцария [Stahelin et al., 1998]. Этот ряд (далее AR) был дополнен по 12.2009 г. данными [WUODC, 2009].

Не имеющие пропусков зонально-усредненные среднемесячные значения ОСО ($65^\circ S$ – $65^\circ N$, с шагом 5° по широте) за 01.1979–12.2005 гг. были сформированы ранее в работе [Вишератин, 2007б] на основе данных 8-й версии Total Ozone Mapping Spectrometer [NASA Goddard Space Flight Center. (<http://www.toms.gsfc.nasa.gov>)], (далее TOMS). Второй используемый в настоящей работе массив зонально-усредненных рядов содержит данные последней версии Merged TOMS-SBUV Total Ozone Data, Revision 05, 2009 (далее MOD) за 01.1979–12.2008 гг. [http://hyperion.gsfc.nasa.gov/Data_services/merged]. Небольшие пропуски в данных MOD были заполнены методом кубической интерполяции.

В качестве индекса солнечной активности использовался международный индекс числа солнечных пятен Ri [SIDC-team, 2009].

3. МЕТОДЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ

3.1. Спектральный анализ. Амплитуды и периоды гармоник анализируемых рядов определялись с помощью модифицированного Фурье-преобразования (ФП) [Scargle, 1982]. При необходимости, более точные значения периодов колебаний находились с помощью метода максимальной энтропии Берга (МБ). В алгоритме МБ вместо быстрого Фурье-преобразования было использовано ФП. Устойчивость спектральных оценок по мето-

ду МБ оценивалась для различных параметров авторегрессии. Более подробное описание применяемых спектральных методов содержится в работе [Вишератин и Карманов, 2008].

В качестве примера на рис. 1 приведены амплитудные спектры ряда Ri и озонового ряда AR . Периоды колебаний, найденные методами ФП (МБ) равны 8.7; 10.6 лет (8.3; 10.3; 10.95 лет) для Ri и 9.6; 12.1 лет (9.5; 10.0; 12.4 лет) для AR . Согласно определению Фурье-преобразования эти периоды представляют собой средние значения за интервал времени с 1932 по 2009 гг., и для других интервалов могут изменяться.

Для того, чтобы оценить временную изменчивость спектрального состава колебаний, использовался скользящий (оконный) спектральный анализ. Для этого выбирался временной промежуток длиной от 20 до 36 лет, который с шагом 1 месяц смещался от начала до конца ряда. Для каждого такого отрезка ряда проводился спектральный анализ методами ФП и МБ. Метод ФП для таких окон чаще всего дает один широкий пик. Метод МБ, хотя и не дает точных количественных значений амплитуд, однако обладает существенно более высоким разрешением, и в различные периоды времени показывал наличие одного-двух пиков, положение которых варьировало в пределах 8–13 лет. На рисунке 2 показаны скользящие спектры рядов солнечной активности Ri и озонового ряда AR методом МБ.

Из рисунка 2 видно, что периоды колебаний Ri и AR с течением времени меняются в интервале 8–13 лет, и для всего периода 1932–2009 гг. трудно выделить одно стабильное колебание. Поэтому для каждого индивидуального спектра (на каждом шаге) было выделено колебание, имеющее максимальную амплитуду. Если рассмотреть вре-

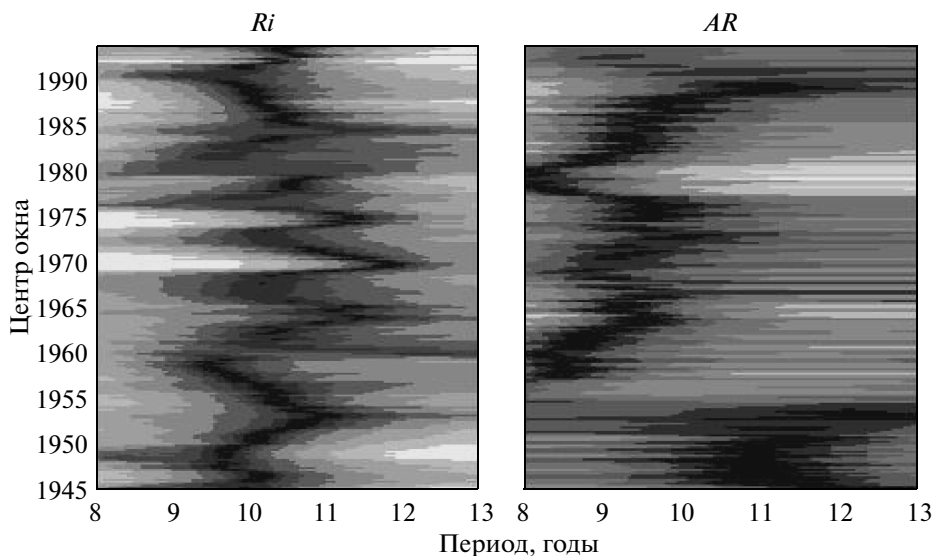


Рис. 2. Трансформация спектральной структуры колебаний рядов *Ri* и озонового ряда *AR* с течением времени. Метод МБ, ширина окна 26 лет, шаг 1 месяц. По оси ординат отложены середины оконных промежутков. Черный цвет соответствует максимумам колебаний в отн. ед.

менные вариации таких колебаний, то для ряда *Ri* можно отметить общую тенденцию увеличения периода основных колебаний с ~10 лет (окна с центрами в интервале 1945–1950 гг.) до ~11 лет для окон с центрами в интервале 1965–1975 гг. и возврат к прежним значениям к концу 80-х годов. Для озонового ряда обращает внимание произошедшее в 50-х годах резкое уменьшение периода колебаний, причины которого не ясны. В дальнейшем происходит рост периодов ряда *AR* до 9.5–10 лет к 1965–1975 гг., уменьшение в конце 70-х–начале 80-х и дальнейший постепенный рост до значений 9.5–10 лет.

3.2. Композитные ряды. Приведенные выше результаты скользящего спектрального анализа показывают, что в основном квазидесятилетние колебания в рядах *Ri* и *AR* проявляются в интервале 8–13 лет, причем с течением времени спектральный состав колебаний может значительно меняться. Для того, чтобы сопоставить временной ход КДВ в рядах озона и солнечной активности, была проведена фильтрация гармоник. С этой целью были сконструированы композитные временные ряды, содержащие только квазидесятилетние колебания в интервале 8–13 лет. На первом этапе для индекса солнечных пятен и озонового ряда вычислялись коэффициенты Фурье-преобразования с шагом по частоте 0.00005 мес⁻¹. На втором этапе для полного набора коэффициентов для периодов от 8-ми до 13-ти лет рассчитывалось обратное Фурье-преобразование и составлялся так называемый композитный временной ряд, содержащий сумму только квазидесятилетних гармоник.

Пример формирования композитных рядов показан рис. 3 для ряда *Ri* и на рис. 4 для ряда *AR*. Отметим, что в спектре озонового ряда присутствуют также колебания с периодами вблизи 5 и 15-ти лет, наблюдаемые и в некоторых других геофизических и климатических рядах.

Для среднезональных рядов ОСО были составлены аналогичные композитные ряды для интервала 1979–2005 гг. (TOMS) и 1979–2008 гг. (MOD). В этом случае композитные ряды для *Ri* конструировались также за промежутки времени 1979–2005 гг. и 1979–2008 гг. Достоинство применяемого метода композитных рядов в том, что в отличие от других методов фильтрации, не происходит сдвига фазы фильтруемых колебаний, и длина ряда не укорачивается. При этом остается ясной смысловая нагрузка композитного ряда как суммы гармонических составляющих в определенном, выбранном заранее, диапазоне частот.

4. КВАЗИДЕСЯТИЛЕТНИЕ ВАРИАЦИИ ОБЩЕГО ОЗОНА В 1932–2009 гг.

Композитные ряды для индекса солнечной активности и озоновых данных ст. Ароза сопоставлены на рис. 5. Заметна модуляция рядов *AR* и *Ri* длиннопериодным колебанием с периодом порядка 40 лет с минимумом вблизи 1969–1970 годов. Как следует из рисунка, фазовые соотношения с течением времени меняются. До 1970 г. фаза колебаний *AR* отстает от *SA*, а в дальнейшем опережает. В период с середины 60-х до середины 70-х годов фаза КДВ содержания озона и вариаций солнечной активности (для средних широт северного полушария, где расположена ст. Ароза)

ВИШЕРАТИН

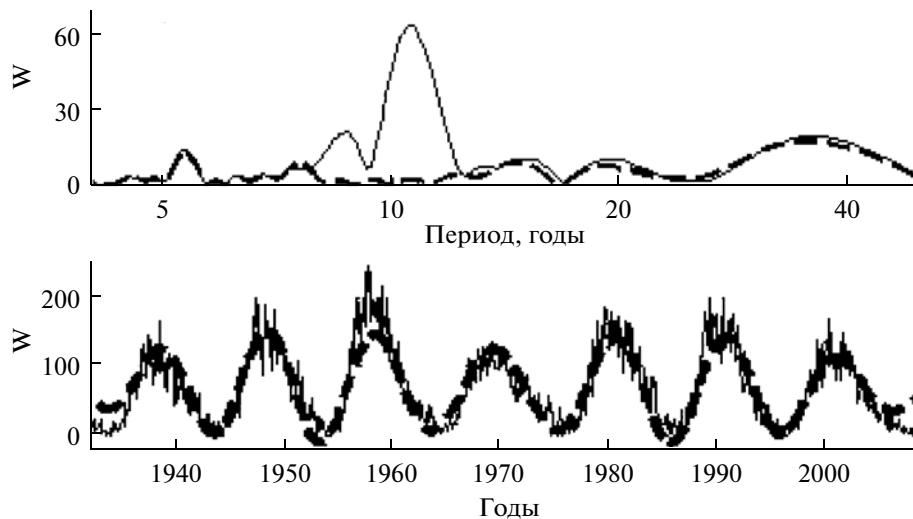


Рис. 3. Амплитудный спектр чисел Вольфа W (ряд Ri за 1932–2009 гг., верхний рисунок, сплошная линия). Штриховая линия – спектр ряда Ri , из которого вычтены колебания с периодами 8–13 лет. На нижнем рисунке приведен исходный ряд Ri и жирной штриховой линией – композитный ряд, содержащий только сумму гармоник с периодами от 8 до 13 лет.

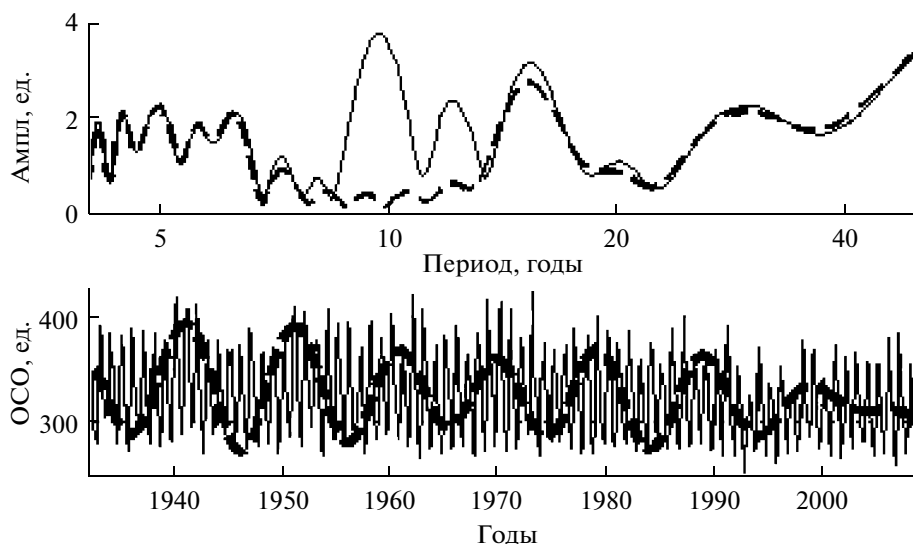


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, но для ряда общего содержания озона AR . Амплитуда квазидесятилетних колебаний на нижнем рисунке увеличена в 10 раз.

почти совпадала. Годы максимумов композитных рядов для AR (A_{max}) и для Ri ($R1_{max}$) и разность между ними в годах ($A_{max} - R1_{max}$) приведены в таблице.

Фазовые соотношения между вариациями ОСО и числами Вольфа для различных наборов озоновых данных и, в том числе, данных Арозы, обсуждались ранее в значительном числе публикаций. В большинстве работ метод нахождения фазовых соотношений основывался на корреляционном анализе. При сдвиге (лаге) рядов относительно друг друга вычислялись коэффициенты корреляции, и величина лага, при котором коэф-

фициент корреляции был максимален, интерпретировалась как фазовый сдвиг. Противоречия между выводами различных авторов во многом объясняются временной изменчивостью фаз максимумов квазидесятилетних колебаний общего озона и солнечной активности. Из рисунка 5 очевидно, что для различных периодов времени результаты исследований должны были давать различные значения сдвига: от почти противофазного до синфазного. Отметим, что близкий к нулю лаг между рядами озона и солнечными индексами может вычисляться при анализе рядов, приблизительно симметричных относительно 1970 г., когда

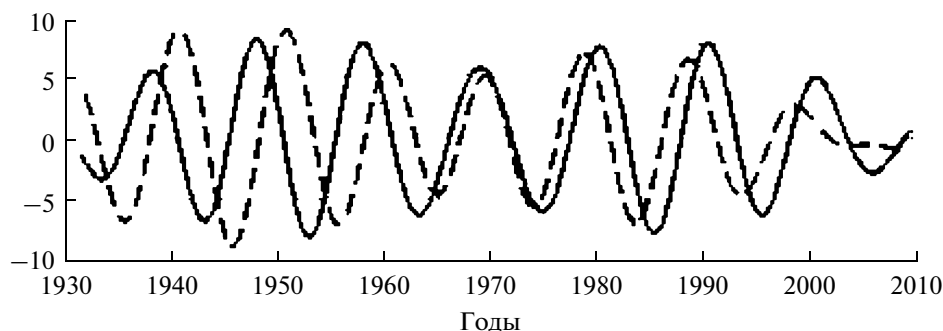


Рис. 5. Композитные ряды (сумма колебаний с периодами 8–13 лет) индекса солнечных пятен R_i (сплошная линия) и общего содержания озона на ст. Ароза (штриховая линия). Амплитуды даны в отн. ед.

происходит компенсация фазовых сдвигов (см., например, [Angell, 1989]). Вместе с тем в работах [Hill and Sheldon, 1975; Keating, 1981; Angell, 1989] высказывались предположения, что фазовые соотношения между общим озоном и индексом солнечных пятен могут изменяться со временем. При анализе длиннопериодных колебаний озона по данным Арозы за 1932–1986 г. [Kane, 1988], видимо впервые, отметил, что после 1970 г. максимум этих колебаний начал опережать аналогичный максимум очередного цикла 11-летней солнечной активности.

В таблице приведены годы максимумов квазидесятилетних колебаний в 17–23 циклах солнечной активности и промежутки в годах между этими максимумами. Как следует из таблицы, с 1932 по 1965 г. фаза колебаний AR отстает от R_i на 2.5–2.8 г., а в 1975–2006 г. опережает примерно на 1.5 г.

Годы максимумов композитного ряда $R1max$ в таблице близко совпадают с максимумами оригинальных рядов солнечной активности R_i (рис. 3). Вместе с тем, уже давно было отмечено (см., например, [Рубашев, 1964; Витинский и др., 1976] и цитируемую литературу), что развитие 11-летнего цикла характеризуется тремя фазами: роста, максимума и спада. В первой половине каждого 11-летнего цикла имеется точка перелома, после которой фаза быстрого роста активности суще-

ственно замедляется. Нами были выделены даты, когда начальный непрерывный и быстрый рост числа солнечных пятен сменялся более пологим. Эти даты ($R2max$) и промежутки времени между максимумами ($Amax-R2max$) также приведены в таблице. В этом случае фазовые сдвиги ($Amax-R2max$) для 3-х последних циклов оказываются почти синфазными с датами окончания ветви роста солнечной активности (точками перелома), а в 17–19-ом циклах отстают примерно на 4 года.

Хотя выделение точек перелома в определенной мере имеет субъективный характер, ошибки в их определении не превышают 0.5 года [Рубашев, 1964; Витинский и др., 1976] и не влияют на основную тенденцию изменения со временем разности фаз ($Amax - R2max$). Наблюдаемая (таблица) временная изменчивость фазовых соотношений между СА и ОСО позволяет провести аналогию физического плана с вынужденными колебаниями. Если, согласно рис. 1, принять среднюю продолжительность цикла солнечной активности равной 10.5 лет (2π), то в 17–19-ом циклах разность фаз ($Amax - R2max$) составляла около $3/4\pi$, в 20-м цикле была близка к $\pi/2$, а в последние десятилетия разность фаз близка к нулю. Известно, что вынужденные колебания при малых частотах воздействия происходят с частотой вынуждающей силы, резонанс характеризуется фазовой задержкой $\pi/2$, а при частотах, превы-

Годы максимумов КДВ для AR ($Amax$), для R_i ($R1max$ и $R2max$) и разность между ними в годах

Солнечный цикл	$R1max$	$Amax$	$Amax-R1max$	$R2max$	$Amax-R2max$
17	1938.7	1941.2	2.5	1937.0	4.2
18	1948.5	1951.3	2.8	1947.4	3.9
19	1958.4	1961.0	2.6	1956.9	4.1
20	1969.4	1970.0	0.6	1967.1	2.9
21	1980.7	1979.3	-1.4	1979.1	0.2
22	1991.0	1989.0	-2.0	1989.0	0.1
23	2001.0	1999.2	-1.8	1999.5	-0.3

шающих собственную частоту колебаний, задержка достигает π , т.е. половины периода (напр., [Киттель и др., 1975]). Таким образом, если предположить, что КДВ общего озона вынуждаются вариациями солнечной активности и связаны с моментом окончания ветви роста солнечной активности, то вблизи 20-го цикла солнечной активности колебания озона находились в стадии перехода через резонанс с колебаниями СА.

Вместе с тем из рис. 5 видно, что амплитуда колебаний озона в этот период имела не максимум, а минимум, т.е. резонанс амплитуд не наблюдался. Возможны следующие причины отсутствия резонанса амплитуд. Во-первых, из рис. 5 следует, что максимумы СА наблюдались примерно в 1945–1950 и 1985–1990 гг., а минимум приходится примерно на 1970 г. То есть уменьшение амплитуды КДВ озона вблизи 70-х годов возможно связано с минимумом длиннопериодного колебания солнечной активности с периодом около 40–50 лет. Амплитуда этой периодичности невелика и, возможно, это гармоника более длительного цикла около 88 лет (см., например, [Feynman and Gabriel, 1990]). Во-вторых, используя известное соотношение $\Omega_{рез}^2 = \Omega_0^2 - 2\beta^2$, $\beta = 1/\tau$ [Киттель и др., 1975] и зная примерно частоты вынужденных колебаний при резонансе $\Omega_{рез}$ и собственных колебаний Ω_0 , можно грубо оценить характерный период затухания τ . Как оказалось, величина τ составляет примерно 5–7 лет, или около половины цикла активности Солнца. Величина затухания весьма значительна, и в таких случаях резонанс амплитуды или очень мал или не проявляется.

Приведенные выше результаты, к сожалению, основаны на единственном длительном ряде измерений ОСО. Кроме того, специальные расчеты по составлению композитных рядов для модельных рядов различной длины показали, что при конструировании композитных рядов амплитуда максимума (или минимума) КДВ в начале и конце ряда обычно занижена, а даты экстремумов колебаний на концах ряда могут иметь погрешность до одного года. Поэтому возникают неопределенности при анализе данных других озоновых станций включающих в предшествующие 70-м годам в лучшем случае только один максимум солнечной активности.

Следует отметить поведение КДВ озона в последнее десятилетие (рис. 5). Если КДВ общего озона определяются свойствами только атмосферы Земли и не связаны с солнечной активностью, то в 2007–2008 гг. должен был наблюдаться очередной максимум КДВ озона. Однако амплитуда этих колебаний в 2005–2009 гг. близка к нулю. Причиной подобного поведения может служить затянувшийся минимум очередного цикла солнечной активности, признаки окончания которого начали проявляться только в конце 2009 г. Ви-

димо, дальнейшие наблюдения за общим содержанием озона в условиях начавшегося с конца 2009 г. роста солнечной активности, уточнят, связано ли отсутствие экстремумов озона в последние годы с солнечной активностью.

Интересно отметить, что в период 60–70-х годов прошлого века происходили изменения в поведении ряда космико-гелиофизических и геофизических факторов. В 70-х годах рост магнитного момента диполя Солнца сменился спадом, и напряженность полярного магнитного поля Солнца в последние 3 цикла снижается [Обридко и Шельтинг, 2009]. [Lockwood and Fröhlich, 2008] показали, что в 1960–1980 гг. происходила смена долговременных тенденций изменчивости потока космических лучей, а также вариаций приземной температуры. Изменения в 70-х годах характера трендов отмечены и для температуры внутриконтинентальных районов Евразии [Жеребцов и др., 2004], и для временного хода глобального содержания CO_2 [Зуев и др., 2005]. Отметим также, что именно после 70-х годов наметилась тенденция к падению общего содержания озона, проявились особенности антарктической озоновой аномалии.

Известно, что существует взаимосвязь вариаций общего озона и высоты тропопаузы и геопотенциала (например, [Bronnimann et al., 2000]). В этой связи отметим работу [Coughlin and Tung, 2004], в которой анализировалась изменчивость геопотенциала за 1958–2003 гг. с помощью так называемого нелинейного метода модовой декомпозиции (EMD). [Coughlin and Tung, 2004] привели рисунок, на котором соотношения между фазами максимумов геопотенциала и солнечной активности подобны представленным нами на рис. 5 для общего озона. Однако авторы ограничились констатацией значимости коэффициента корреляции, не обратив внимания на различия в фазовых соотношениях. Следует заметить, что ранее возможность резонансного воздействия 11-летней солнечной цикличности рассматривалась для других геофизических параметров. Например, механизм задержанного осциллятора привлекался в работе [White and Liu, 2008] для интерпретации квазидесятилетних колебаний температуры Тихого океана.

На наш взгляд, наблюдаемые особенности временной изменчивости фазовых соотношений указывают на достаточно сложный механизм связи Солнце–озон. Возможно, что в 70-х годах прошлого века произошли изменения этих связей, приведшие к переходу из одного квазистационарного состояния в другое. Вместе с тем, квазидесятилетние вариации ОСО могут быть следствием процессов, охватывающих не только атмосферу, но и систему атмосфера–океан (см., например работы, [Монин и Шишков, 1998; Gauss et al., 2006]).

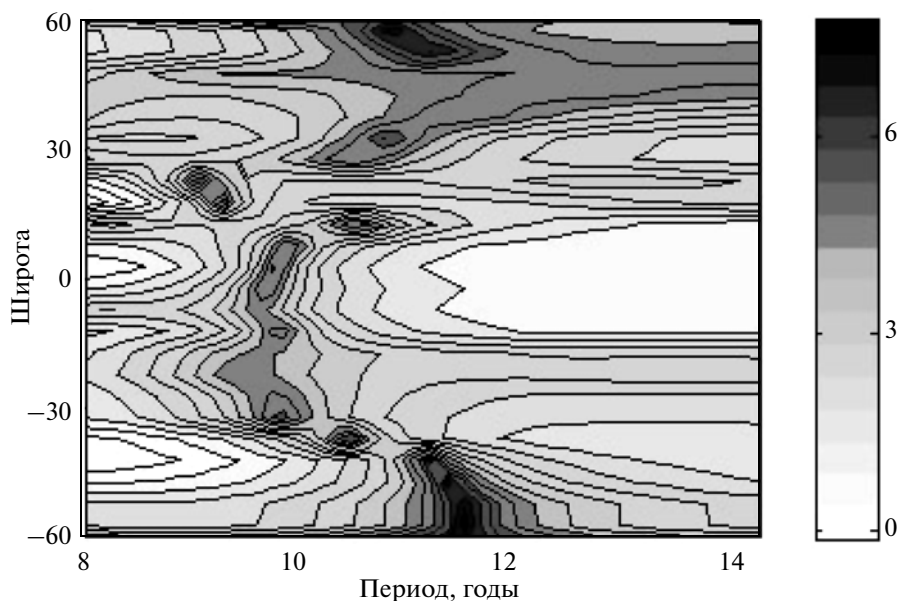


Рис. 6. Распределение с широтой спектральной амплитуды общего озона (данные MOD, метод МБ, в отн. ед.).

Отметим, что изменения знака корреляции с фазами максимумов солнечной активности с периодом около 30–40 лет наблюдаются для квазидесятилетних колебаний некоторых других климатических рядов [Visheratin and Bugrim, 2009].

5. ГЛОБАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КВАЗИДЕСЯТИЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЙ В ПОЛЕ ОСО

Рассмотренные выше соотношения между квазидесятилетними вариациями солнечной активности и озонового слоя по данным ст. Ароза относятся к средним широтам северного полушария. Для того, чтобы исследовать глобальное распределение фазы и амплитуды квазидесятилетних колебаний, использовались данные спутниковых наблюдений ОСО. Широтное распределение амплитуд гармоник с периодами 8–14 лет для среднезональных рядов общего содержания озона MOD исследовалось с помощью методов ФП и МБ. Метод ФП имеет более низкое разрешение, однако дает представление об амплитудах колебаний. Максимальные амплитуды наблюдаются для периодов 11–11.5 лет на широтах (60–65)° S и N. Два максимума с колебаний с периодами 9.5–10 лет с амплитудой 3–4 ЕД расположены почти симметрично на 20° S и N. Для внетропических зон характерным является смещение к более длиннопериодным колебаниям (от 9–9.5 к 11–11.5 лет), что более четко показывает метод МБ (рис. 6).

Для того, чтобы определить фазовые соотношения между вариациями ОСО и солнечной активности, для каждой широтной зоны были со-

ставлены композитные ряды, содержащие суммарные колебания в диапазоне 8–13 лет. Результаты расчетов фазы максимума квазидесятилетних колебаний в зависимости от широты для среднезональных рядов TOMS и MOD представлены на рис. 7.

Данные расчетов по двум массивам озоновых данных (MOD-TOMS) близки для 22-го цикла и имеют систематическое расхождение порядка 1–2 года для 21 и 23-го циклов, причины которого вероятно связаны с различием в методах составления этих рядов. Для широты, на которой расположена ст. Ароза (46.8° N), фазы максимумов для 23-го цикла по данным MOD совпадают с полученными выше для ряда AR, а в 21 и 22-ом циклах расхождение составляет около полугода. Как уже говорилось, малая длина рядов спутниковых наблюдений может вносить дополнительные погрешности при определении фазы колебаний, но, тем не менее, общая тенденция широтного хода как по данным MOD так и TOMS достаточно очевидна. Максимум КДВ 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 [Вишератин и Сизов, 2009].

В первом приближении широтный ход фазы КДВ по данным MOD можно аппроксимировать формулой

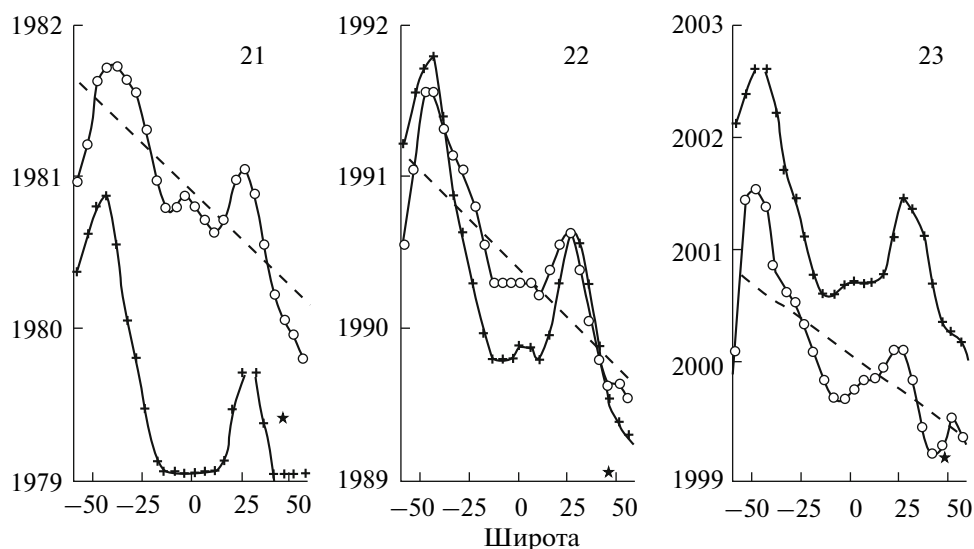


Рис. 7. Широтный ход фазы максимума квазидесятилетних колебаний общего озона в 21–23-м циклах солнечной активности. Кружки – данные MOD (1979–2008 гг.), крестики – данные TOMS (1979–2005 гг.). Штриховая линия – аппроксимация широтного тренда по формуле (1). Звездочки – максимумы КДВ общего озона по данным ст. Ароза (1932–2009 гг.).

$$Y = YO - B * L, \quad (1)$$

где $YO = 1980.9 \pm 0.1$; 1990.4 ± 0.1 ; 2000.1 ± 0.1 и $B = 0.012 \pm 0.003$; 0.012 ± 0.003 ; 0.013 ± 0.003 для 21–23-го циклов соответственно; L – широта в градусах от -62.5° S до $+62.5^\circ$ N. Погрешность определения коэффициентов находилась с учетом неопределенности в положении максимума фазы для каждой широтной зоны (около полугода). Как видно, во всех трех циклах коэффициенты тренда очень близки, и среднее значение B для всех трех циклов равно 0.0124 ± 0.0052 . Имеются две широтные зоны (вблизи 25° N и 45° S) в которых наблюдаемое локальное отставание фазы максимума КДВ общего озона наиболее велико. Отметим, что в этих широтных зонах происходит переход от характерных для тропиков колебаний с периодами 9.5–10 лет к более длиннопериодным колебаниям (рис. 6). Согласно представленным на рис. 7 данным, в высоких и умеренных широтах северного полушария максимум КДВ наступает в конечной фазе роста солнечной активности или в начальной фазе максимума. Постепенное отставание фазы ОСО приводит к тому, что в южных умеренных широтах максимумы ОСО соответствуют примерно финальной стадии фазы максимума солнечной активности. В тропиках амплитуда КДВ общего озона минимальна, а фаза озона на протяжении последних трех циклов солнечной активности оставалась близка к середине фазы максимума солнечной активности. Таким образом, значительное расхождение (до 2-х лет) в моментах максимума квазидесятилетних колебаний общего озона для различных широтных зон не выходит за границы продолжительности фазы

максимума солнечной активности, которая в среднем имеет продолжительность около 3-х лет.

Ранее для экваториальной и тропической зоны близкое совпадение максимумов длиннопериодных вариаций ОСО и СА отмечалось при анализе спутниковых данных в работе [Fioletov et al., 2002] и в ряде других работ. Несложно также заключить, что в тех случаях, когда в работах проводился анализ усредненных (глобальных) данных, происходила компенсация фазовых сдвигов в северном и южном полушариях, и среднее значение фазового сдвига между КДВ ОСО и СА оказывалось близким к нулю, что приводило к выводу о синфазности глобальных квазидесятилетних вариаций ОСО и солнечной активности (например, [Бекрюков, 2009]).

5. ВЫВОДЫ

Анализ временной изменчивости фазовых соотношений между квазидесятилетними вариациями ОСО и солнечной активностью для периода 1932–2009 гг. показал, что до 20-го цикла фаза колебаний озона отстает от СА примерно на 2.5 года, а в дальнейшем опережает примерно на 1.5 года. В период с середины 60-х до середины 80-х годов для средних широт северного полушария фаза колебаний практически совпадала. В предположении, что квазидесятилетние колебания ОСО вынуждаются вариациями солнечной активности, показано, что вблизи 70-х годов квазидесятилетние колебания ОСО (ст. Ароза (46.8° N) и солнечной активности были близки к резонансу и сдела-

на оценка характерного периода затухания квазидесятилетних колебаний общего озона: 5–7 лет.

Глобальное распределение фаз и амплитуд квазидесятилетних вариаций изучалось для среднезональных рядов ОСО. В высоких и умеренных широтах северного полушария максимум квазидесятилетних колебаний общего содержания озона наблюдается приблизительно в фазе окончания роста солнечной активности. В южных умеренных широтах максимума озона отстают на 1–2 года и близки к финальной стадии фазы максимума солнечной активности. В тропиках фаза озона на протяжении последних трех циклов солнечной активности оставалась близкой к середине фазы максимума солнечной активности. Схожесть широтного хода фазы КДВ общего озона и величины тренда в последние 21–23-й циклы солнечной активности дают основания для предположения, что и в предыдущие циклы фазовые соотношения ОСО–СА имели аналогичный широтный ход. Отсутствие длительных и надежных рядов измерений ОСО в других широтных зонах и, в частности, в южном полушарии, оставляет этот вывод гипотетическим.

Представленные в работе основные тенденции временной и пространственной изменчивости фазы квазидесятилетних колебаний общего озона и 11-летнего цикла солнечной активности могут найти применение в задачах моделирования и прогноза озонового слоя, а также позволяют объяснить ряд опубликованных ранее противоречивых результатов.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, гранты № 06-05-64157, 10-05-00356.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Бекорюков В.И., Глазков В.Н., Кокин Г.А.* Долговременные изменения глобального озона. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 45. № 5. С. 607–616. 2009.
- *Витинский Ю.И., Оль А.И., Сазонов Б.И.* Солнце и атмосфера Земли. Л.: Гидрометеиздат, 352 с. 1976.
- *Вишератин К.Н.* Квазидесятилетние колебания параметров нижней стратосферы // Сб. докл. Межд. симп. “Физика атмосферы: наука и образование.” Санкт-Петербург – Петродворец. С. 225–229. 2007а.
- *Вишератин К.Н.* Межгодовые вариации и тренды среднезональных рядов общего содержания озона, температуры и зонального ветра // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 43. № 4. С. 67–85. 2007б.
- *Вишератин К.Н., Васильев В.И., Сизов Н.И.* 11-летняя цикличность в общем содержании озона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Вып. 5. Том I. С. 429–434. 2008.
- *Вишератин К.Н., Карманов Ф.И.* Практические методы оценивания спектральных параметров. Учебн. пособие по курсу “Вычислительные методы в инженерных расчетах”. Обнинск: ИАТЭ. 60 с. 2008. (<http://www.typhoon.obninsk.ru/last/papers>).
- *Вишератин К.Н., Сизов Н.И.* Пространственно-временные вариации фаз основных колебаний общего содержания озона // Тез. докл. Межд. симп. стран СНГ. “Атмосферная радиация и динамика (МСАРД-2009). Санкт-Петербург. С. 151–152. 2009.
- *Груздев А.Н., Брассер Г.П.* Воздействие 11-летнего цикла солнечной активности на характеристики годового хода общего содержания озона // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 43. № 3. С. 379–391. 2007.
- *Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И.* Радиационный баланс атмосферы и климатические проявления солнечной активности. // Опт. Атм. Океана. Т. 17. № 12. С. 1003–1017. 2004.
- *Зуев В.В., Зуева Н.Е., Бондаренко С.Л.* Влияние долгопериодных колебаний озоносферы века на изменчивость глобального содержания CO₂ в атмосфере // Опт. Атм. Океана. Т. 18. № 7. С. 621–626. 2005.
- *Киттель Ч., Найт У., Рудерман М.* Берклевский курс лекций. Механика (Том 1). М.: Наука. 480 с. 1975.
- *Монин А.С., Шишков Ю.А.* О пятилетней цикличности погоды // ДАН. № 3. С. 395–398. 1998.
- *Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д.* Некоторые аномалии эволюции глобальных и крупномасштабных магнитных полей на Солнце как предвестники нескольких предстоящих невысоких циклов // Письма в Астрон. журн. Т. 35. № 4. С. 279–285. 2009.
- *Рубашев Б.М.* Проблемы солнечной активности. Л.: Наука. 362 с. 1964.
- *Титова Е.А., Кароль И.Л., Шаламянский А.М., Клягина Л.П., Соломатникова А.А.* Статистический анализ и сравнение эффектов внешних факторов, влияющих на поле общего содержания озона над территорией России в 1973–2007 гг. // Метеорология и гидрология. № 7. С. 48–64. 2009.
- *Angell J.K.* On the relation between atmospheric ozone and sunspot number // J. Climate. V. 2. P. 1404–1416. 1989.
- *Angell J.K., Korshover J.* Quasi-biennial and long-term fluctuations in total ozone // Mon. Weath. Rev. V. 101. P. 426–443. 1973.
- *Bronnimann S., Luterbacher J., Schmutz C., Wanner H., Staehelin J.* Variability of total ozone at Arosa, Switzerland, since 1931 related to atmospheric circulation indices // Geophys. Res. Lett. V. 27(15). P. 2213–2216. 2000.
- *Calisesi Y., Bonnet R.-M., Gray L., Langen J., Lockwood M.* (Editors). Solar Variability and Planetary Climates. Berlin: Springer – Verlag. 474 p. 2007.
- *Coughlin K.T., Tung K.K.* 11-Year solar cycle in the stratosphere extracted by the empirical mode decomposition method // Adv. Space Res. V. 34. P. 323–329. 2004.
- *Feynman J., Gabriel S.B.* Period and phase of the 88-year solar cycle and the Maunder minimum: evidence for a chaotic Sun // Sol. Phys. V. 127. P. 393–403. 1990.
- *Fioletov V.E., Bodeker G.E., Miller A.J., McPeters R.D., Stolarski R.* Global and zonal total ozone variations es-

- timated from ground-based and satellite measurements: 1964–2000 // *J. Geophys. Res.* 107, (D22), 4647, doi: 10.1029/2001JD001350, 2002.
- *Gauss M., Myhre G., Isaksen I.S.A., et al.* Radiative forcing since preindustrial times due to ozone change in the troposphere and the lower stratosphere // *Atmos. Chem. Phys.* 6. 575–599, doi: 105194/acp-6-575-2006, 2006.
 - *Hill W.J., Sheldon P.N.* Statistical modeling of total ozone measurements with an example using data from Arosa, Switzerland // *Geophys. Res. Lett.* V. 2(12). P. 541–544. 1975.
 - *Kane R.P.* Long term variation of total ozone // *Pure Appl. Geophys.* V. 127. № 1. P. 143–154. 1988.
 - *Keating G.M.* The response of ozone to solar variations: a review // *Solar Phys.* V. 74. P. 321–347. 1981.
 - *Lockwood M., Fröhlich C.* Recent oppositely directed trends in solar climate forcings and the global mean surface air temperature. II. Different reconstructions of the total solar irradiance variation and dependence on response time scale // *Proc. R. Soc. A.* № 464. P. 1367–1385. 2008.
 - *Raspopov A.M., Dergachev V.A., Kolstrom T.* Periodicity of climate conditions and solar variability derived from dendrochronology and other palaeoclimatic data in high latitudes // *PALAEO.* № 209. P. 127–139. 2004.
 - *Scargle J.D.* Studies in astronomical time series analysis. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // *Astrophys. J. Geophys. Res. Lett.* V. 263. P. 835–853. 1982.
 - SIDC-team, 2009. World Data Center for the Sunspot Index, Royal Observatory of Belgium, Monthly Report on the International Sunspot Number, (<http://www.sidc.be/sunspot-data>).
 - *Staehelin J., Renaud A., Bader J., McPeters R., Viatte P., Hoegger B., Bugnion V., Giroud M., Schill H.* Total ozone series at Arosa (Switzerland): Homogenization and data comparison // *J. Geophys. Res.* V. 103. P. 5827–5841. 1998. (ftp://iaclin2.ethz.ch/pub_read/maeder/).
 - *Stolarski R.S., Bojkov R., Bishop L., Zerefos C., Staehelin J., Zawodny J.* Measured trends in stratospheric ozone // *Science.* V. 256. P.342–349. 1992.
 - *Trenberth K.E., Hurrelle J.W.* Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific // *Climate Dynamics.* V. 9. P. 303–319. 1994.
 - *Visheratin K.N., Bugrim G.I.* Solar activity variations, wheat prices in preindustrial Europe and quasidecadal total ozone variability // Рабочее совещание-дискуссия “Циклы активности на Солнце и звездах”, Москва, 18–19 декабря 2009. Сборник статей. Санкт-Петербург: Астроном. общество. С. 251–258. 2009.
 - *Wang S.-Y., Gillies R.R., Hipps L.E., Jin J.* A transition-phase teleconnection of the Pacific quasi-decadal oscillation // *Climate Dynamics.* DOI:10.1007/s00382-009-0722-5. 2010.
 - *White W.B., Liu Z.* Resonant excitation of the quasi-decadal oscillation by the 11-year signal in the Sun’s irradiance // *J. Geophys. Res.* V. 113, C01002, doi: 10.1029/2006JC004057. 2008.
 - WMO, 2007. World Meteorological Organization Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006, Global Ozone Research and Monitoring Project. Report No. 50, Geneva, 2007.
 - WOUDC, 2009. World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre (www.woudc.org).
 - *Zerefos C., Contopoulos G., Skalkeas G.* (Editors). Twenty Years of Ozone Decline. Berlin: Springer Science. 470 p. 2009.