

УДК 551.510.5

## КВАЗИДЕСЯТИЛЕТНИЕ ВАРИАЦИИ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА, ВЕТРА, ТЕМПЕРАТУРЫ И ГЕОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ВЫСОТЫ НАД СТАНЦИЕЙ АРОЗА, ШВЕЙЦАРИЯ

© 2016 г. К. Н. Вишератин

Научно-производственное объединение “Тайфун”

249038 Обнинск, ул. Победы, 4

E-mail: kvisher@rpatyphoon.ru

Поступила в редакцию 20.11.2014 г., после доработки 22.05.2015 г.

Представлены результаты анализа фазовых соотношений между квазидесятилетними вариациями (КДВ) в интервале 8–13 лет общего содержания озона на станции Ароза за 1932–2012 гг. и ряда метеопараметров: среднемесячных значений температуры, меридиональной и зональной компонент скорости ветра и геопотенциальных высот для изобарических поверхностей в слое 10–925 гПа над станцией Ароза методами Фурье, композитного и кроссвейвлетного анализа. Показано, что фазовые соотношения КДВ общего содержания озона (ОСО) и метеорологических параметров с 11-летним циклом солнечной активности (СА) изменяются во времени и с высотой, а с начала 24 цикла солнечной активности (2008–2010 гг.) вариации ОСО и ряда метеопараметров происходят приблизительно в противофазе с вариациями СА. Периоды максимальной скорости роста температуры на изобарических поверхностях 50–100 гПа примерно соответствуют периодам максимумов ОСО, а периоды максимумов температуры – периодам наибольшей скорости уменьшения ОСО. Максимальные коэффициенты корреляции между меридиональной скоростью ветра и температурой наблюдаются на уровне 50 гПа при положительных и отрицательных задержках ~27 мес. Моменты максимумов (минимумов) КДВ меридиональной скорости ветра примерно соответствуют периодам максимальной скорости усиления (ослабления) КДВ температуры. КДВ геопотенциальных высот изобарических поверхностей везде, кроме нижней тропосферы, отстают от вариаций ОСО в среднем на 1.5 года. В целом, периоды вариаций ОСО и метеопараметров в интервале 8–13 лет меньше, чем период вариаций уровня солнечной активности.

**Ключевые слова:** озон, температура, зональный ветер, меридиональный ветер, геопотенциальная высота, 11-летний цикл СА, метод композитных рядов.

DOI: 10.7868/S0002351516010107

### ВВЕДЕНИЕ

Одна из наиболее часто обсуждаемых в последние десятилетия тем связана с проблемой долговременных и в том числе квазидесятилетних вариаций (КДВ) общего содержания озона (ОСО), что обусловлено ключевой ролью озоносферы в регулировании биологически активного УФ-излучения, а также влиянием озона на температурный режим и динамические процессы стратосферы и тропосферы. КДВ с периодами от 8 до 13 лет свойственны и другим характеристикам атмосферы и подстилающей поверхности. Механизмы влияния на наблюдаемые КДВ озона и других параметров атмосферы 11-летнего цикла солнечной активности (СА) в настоящее время активно исследуются с помощью моделей различной сложности и статистическими методами. Один из таких механизмов получил название “top-down”.

Уменьшение УФ-радиации в минимуме СА непосредственно влияет на содержание стратосферного озона, приводя к охлаждению тропической и среднеширотной стратосферы, ослаблению меридионального температурного градиента (полюс–экватор), замедлению циркуляции Брюера–Добсона, изменению положения циркуляционных ячеек Гадлея и Ферреля, модуляции стратосферного полярного вихря и в итоге оказывает влияние на динамические процессы, охватывающие не только стратосферу, но и всю тропосферу [1, 2]. Другой механизм, “bottom-up”, основан на том, что большая часть радиационного возмущающего воздействия СА (радиационный форсинг) приходится на видимую и ближнюю ИК-область спектра и имеет наибольшие амплитуды в тропиках. Радиационный нагрев вблизи поверхности Земли ведет к увеличению испарения, конвективному переносу поглощенной энергии в виде

скрытого тепла в верхнюю тропосферу тропиков и увеличению меридионального градиента температуры. В фазе минимума СА это приводит к ослаблению циркуляционных ячеек Гадлея и Ферреля и сдвигу положения верхне-тропосферных струйных течений [1, 2]. Интересно, что этот механизм малочувствителен к изменчивости УФ-радиации.

Различные аспекты влияния 11-летнего цикла СА на параметры стратосферы и озон были предметом достаточно большого числа исследований, особенно в последние годы (например [1–5]), что, вероятно, связано с двумя факторами. Во первых, это аномальность 23-го цикла солнечной активности, схожего с вариациями в период Дальтоновского минимума в начале XIX века. 23-й цикл был длиннее предыдущего цикла примерно на 3 года и продолжался до конца 2009 г. Максимум нынешнего, 24-го цикла, вероятно, приходится на 2012–2014 гг. Во вторых, полученные на аппаратуре SORCE/SIM данные о спектральном распределении солнечной радиации в 2004–2007 гг. показали, что изменения потоков солнечной радиации в видимой и ИК-областях спектра находятся в противофазе с изменениями интегральной солнечной радиации [6].

Согласно большинству публикаций последних лет, обзорам [1, 7] и отчету ВМО [8], оценка вклада вариаций уровня СА в вариации ОСО составляет около 2–3%, при этом квазидесятилетние колебания ОСО происходят примерно в фазе с 11-летним солнечным циклом. Вместе с тем фазовые соотношения между амплитудой и фазой годового хода ОСО и вариациями уровня солнечной активности в различных регионах Земли могут существенно различаться [9]. Анализ вариаций отношения смеси озона показал, что в нижней стратосфере средних широт Северного полушария, где расположена ст. Ароза, вариации содержания озона опережают вариации СА примерно на  $90^\circ$  [5]. Ранее в [10] было показано, что как в пространстве, так и во времени спектральный состав вариаций ОСО может значительно изменяться. Для анализа таких квазипериодических вариаций был использован композитный метод фильтрации колебаний в спектральной области [11]. При анализе фазовых сдвигов между вариациями СА и КДВ ОСО на ст. Ароза этот метод показал, что до 1960 г. максимумы КДВ ОСО отставали от соответствующих максимумов уровня СА. В период 70-х годов прошлого века (20-й цикл СА) наблюдались почти синхронные вариации, а в последующие солнечные циклы максимумы КДВ ОСО стали опережать максимумы уровня СА [12].

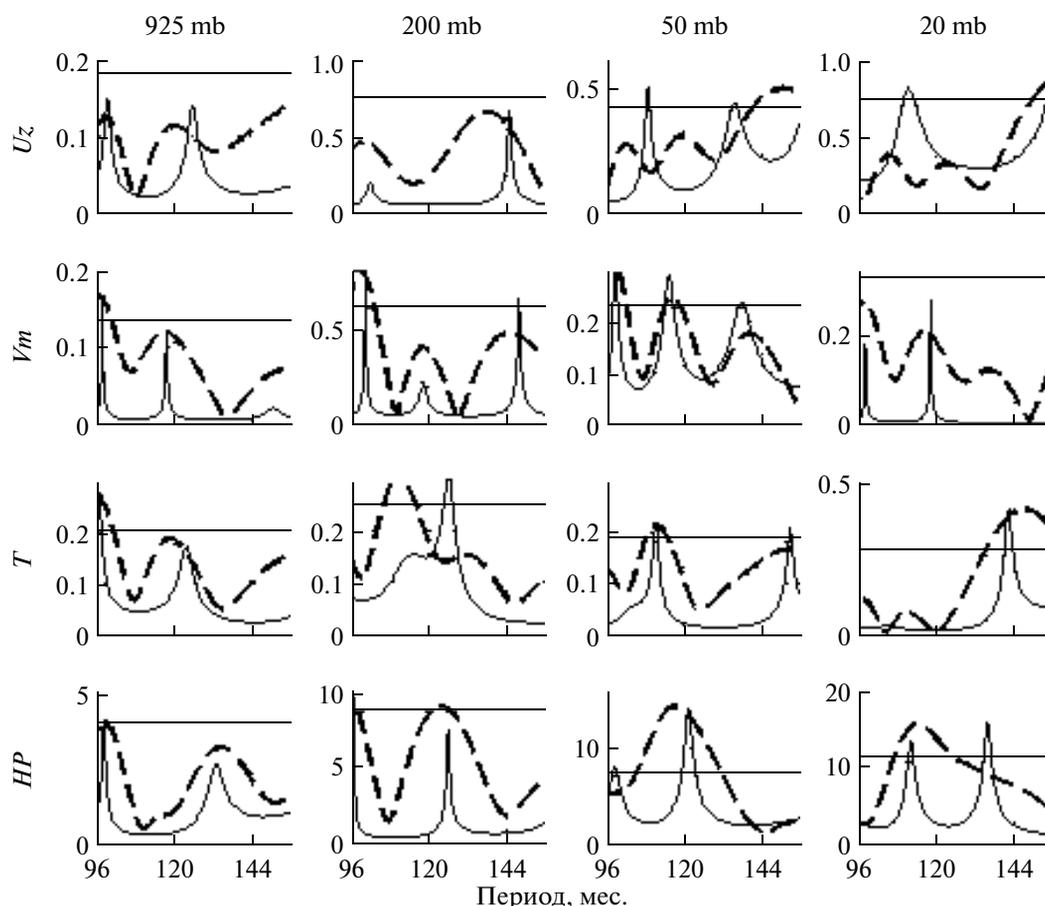
Целью настоящей работы является исследование временных и фазовых соотношений между квазидесятилетними вариациями различных параметров нижней стратосферы и тропосферы (ОСО,

температура, характеристики атмосферной циркуляции) и 11-летними колебаниями уровня СА. Новизна работы заключается в том, что, наряду с квазидесятилетними вариациями ОСО, в ней рассмотрены вариации зональной и меридиональной скоростей ветра, геопотенциальной высоты и температуры во всей толще тропосферы и нижней стратосферы. Анализируемый период охватывает “аномальный” 23-й, и частично текущий 24-й циклы солнечной активности. Используемые ранее методы Фурье- и композитного анализов дополнены кроссвейвлетным анализом.

## 2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Для анализа использовались среднемесячные значения ОСО, полученные на станции Ароза ( $46.78^\circ \text{ N}$ ,  $9.68^\circ \text{ E}$ ) за 1932–2012 гг. [13]. На основе базы данных NCEP-NCAR за 1949–2012 гг. были сформированы усредненные в области  $46^\circ\text{--}47^\circ \text{ N}$ ,  $9^\circ\text{--}10^\circ \text{ E}$  среднемесячные значения температуры, меридиональной ( $U_m$ ) и зональной ( $V_z$ ) скоростей ветра и геопотенциальных высот ( $HP$ ) для изобарических поверхностей от 10 до 925 гПа [14]. В качестве индекса солнечной активности использовался международный индекс числа солнечных пятен ( $R_i$ ) [15].

Для всех исходных рядов на первом этапе был проведен спектральный анализ с помощью модифицированного Фурье-преобразования Ломба–Скаржла (ЛС) [16] и методом максимальной энтропии Берга [17], имеющим более высокое разрешение. Амплитудные спектры для нескольких уровней давления приведены на рис. 1. Они с точностью до нормировочных множителей пропорциональны квадратному корню из суммы квадратов коэффициентов Фурье-преобразования. Спектры, полученные методом Берга, не дают точной информации об амплитудах гармоник и приведены на рис. 1 для сравнения, а спектральные амплитуды даны в относительных единицах. Алгоритмы вычислений этими методами более подробно были рассмотрены в [18]. В области квазидесятилетних колебаний 8–13 лет (96–156 мес.) обычно наблюдаются несколько спектральных пиков. В спектрах меридиональной скорости ветра  $U_m$  на всех высотах достаточно стабильно наблюдается “триплетная” структура колебаний с периодами примерно 98–101, 116–120, 140–145 мес. Амплитуды квазидесятилетних вариаций  $U_m$  составляют 4–5% от амплитуды годовой гармоник. Спектральная структура вариаций геопотенциальной высоты относительно стабильна ниже уровня 50 гПа, с двумя пиками вблизи 96–100 мес. и 120–130 мес. Амплитуды квазидесятилетних вариаций  $HP$  составляют 1–1.5% от амплитуды межгодовых вариаций. Для остальных атмосферных параметров структура спектров с высотой меняется. Ампли-



**Рис. 1.** Амплитудные спектры зональной  $U_z$  и меридиональной компонент скорости ветра  $V_m$ , (м/с), температуры  $T$ , (К), геопотенциальной высоты  $HP$  (гпм), на изобарических поверхностях 925, 200, 50 и 20 гПа за 1949–2012 гг. Штриховая линия – метод Ломба–Скаргла, сплошная линия – метод максимальной энтропии. Горизонтальные сплошные линии – уровни доверительного интервала 90%.

туды КДВ температуры составляют 2–5%, зонального скорости ветра 2–3% от амплитуд годовой гармоники. Для ОСО наблюдаются два пика вблизи 115–116 мес. и 141–143 мес. с амплитудами приблизительно 4 и 2 еД.

Значимость спектральных гармоник (пиков) в полученных спектрах оценивалась по методике [16, 19]. Предварительно временные ряды “отбеливались” [20]. Оценки значимости проводилась при исключении линейного тренда и колебаний с периодами от 3 до 36 мес., содержащих помимо годовой гармоники квазидвухлетние колебания. Незначимы при уровне доверительной вероятности 90% квазидесятилетние колебания зональной скорости ветра на 70 гПа и в слое 200–925 гПа и меридиональной скорости ветра на 10 и 20 гПа. Для остальных метеопараметров и ОСО значимость, по крайней мере, одной из гармоник в интервале периодов 8–13 лет превышает уровень 90%.

Как известно, Фурье-анализ дает сведения о средних за весь анализируемый интервал времени значениях амплитуды, фазы и периода колеба-

ний. Для большинства геофизических рядов, содержащих значительную годовую гармонику и ряд других колебаний, выделение квазипериодических (квазидвухлетних, квазидесятилетних) колебаний и оценка их временной и фазовой изменчивости представляет достаточно сложную задачу. В настоящей работе для выделения квазидесятилетних колебаний использован метод композитных рядов. Он основан на фильтрации колебаний в частотной области и применении обратного Фурье-преобразования для формирования временного ряда, содержащего сумму гармоник в выбранном интервале периодов [10–12]. Модельные расчеты показали, что положение экстремумов композитного ряда определяется с погрешностью менее 5%, а на концах композитного ряда погрешность в некоторых случаях возрастает до 10% (примерно до 1 года в случае квазидесятилетних колебаний). Погрешность определения амплитуд экстремумов составляет примерно 10%, на концах ряда амплитуды колебаний обычно за-

Даты начала и максимумов солнечных циклов и уровни давления, на которых колебания метеопараметров совпадают с максимумами солнечного цикла

№ цикла	Начало цикла	Максимум цикла	НР	$T$	$Vm$	$Uz$
17	09.1933	04.1937	—	—	—	—
18	02.1944	05.1947	—	—	—	—
19	04.1954	03.1958		10, 20	—	500, 925
20	10.1964	11.1968	10–200	10–100	10–925	20–925
21	03.1976	12.1979	10–925	20–500	—	20–50
22	09.1986	07.1989	10–925	50–925	—	925
23	05.1996	04.2000	10–500	50–925	10–925	200–925
24	12.2008	2012–2014?	—	—	—	—

нижены, что связано с особенностями Фурье-преобразования ограниченного по длине ряда.

Чтобы оценить степень, в какой композитный ряд обусловлен случайными процессами, включая красный шум, был использован метод Монте-Карло. Например, для ряда ОСО были сгенерированы случайные ряды красного шума с дисперсией и коэффициентом авторегрессии первого порядка такими же, как и для исходного ряда. Число случайных рядов варьировалось от  $N = 500$  до  $N = 2000$ . Из каждого случайного ряда красного шума составлялся случайный композитный ряд, содержащий гармоники в интервале периодов 8–13 лет. Для каждого из семи полных циклов солнечной активности (с 17-го по 23-й, см. таблицу) вычислялись коэффициенты корреляции  $R$  и величины задержек  $L$ , при которых коэффициент корреляции между КДВ уровня СА и ОСО максимален. Далее подсчитывалось число случайных композитных рядов  $n$ , для которых значения коэффициентов корреляции  $R_s$  были равны или превышали  $R$ , а величина задержки  $L_s$  была такой же или меньше чем  $L$ . Отношение  $n/N$  соответствует вероятности того, что распределение фаз и амплитуд колебаний в исходном композитном ряду ОСО связано со случайными процессами, включая красный шум. Расчеты показали, что при  $N > 1000$  оценки вероятности изменяются слабо и составляют в среднем 3–5%, что соответствует достоверной вероятности 95–97%. Дополнительно для определения фазовых соотношений между рядами и независимой оценки их статистической значимости был использован метод кроссвейвлетного анализа [21].

КДВ ОСО отстают от максимумов  $R_i$ . В период с середины 60-х до середины 70-х годов фаза квазидесятилетних вариаций ОСО и вариаций уровня солнечной активности почти совпадала. В дальнейшем максимумы озона опережают максимумы солнечной активности на 2–3 года. В отличие от результатов работы [12], где анализировались данные по 2009 г., из рис. 2 следует, что в последние годы вариации ОСО происходят в противофазе с вариациями солнечной активности. В целом сопоставление фазовых соотношений показывает, что квазидесятилетние вариации ОСО

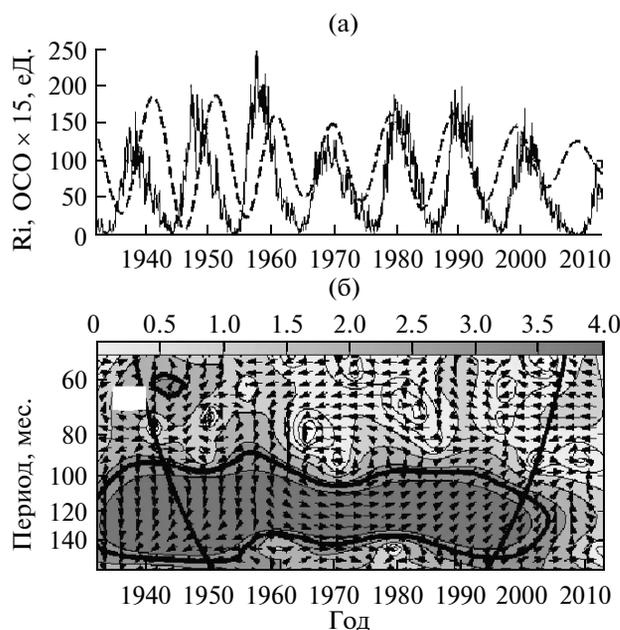
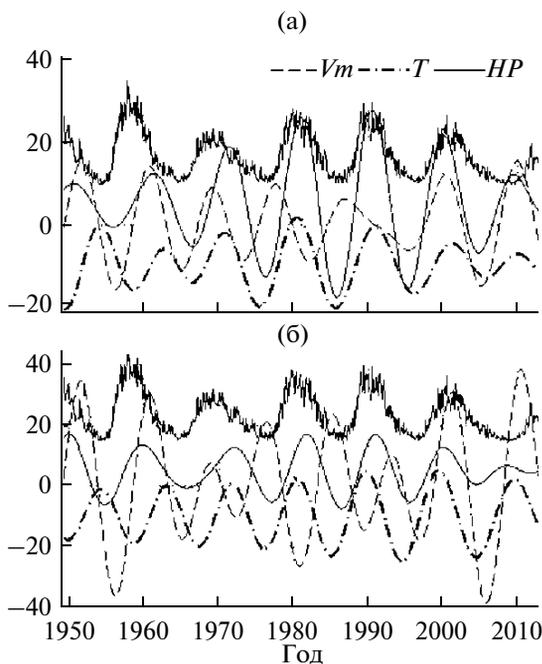


Рис. 2. а – Число солнечных пятен  $R_i$  (сплошная линия) и КДВ общего содержания озона. Значения ОСО умножены на 15 и смещены по оси ординат. б – Кроссвейвлетное преобразование для рядов ОСО и  $R_i$ . Стрелками обозначены фазовые соотношения (вправо – колебания происходят в фазе, влево – в противофазе, вверх – озон опережает СА на  $90^\circ$ , вниз – колебания озона отстают от фазы СА на  $90^\circ$ ).

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

#### 3.1. КДВ общего содержания озона и солнечная активность

Композитные ряды, содержащие сумму колебаний с периодами от 8 до 13 лет, для индекса солнечной активности  $R_i$  и ОСО сопоставлены на рис. 2а. Из него следует, что до 1970 г. максимумы



**Рис. 3.** Число солнечных пятен и КДВ меридиональной скорости ветра  $V_m$ , температуры  $T$  и геопотенциальной высоты  $HP$  на уровнях 50 (а) и 200 (б) гПа. Значения  $T$  и  $V_m$  умножены на 40 и смещены по оси ординат,  $HP$  в отн. ед.

имеют более короткий период, чем вариации солнечной активности, а синхронность (или противофазность) вариаций  $R_i$  и ОСО, вероятно, устанавливается примерно через 80 лет.

В [21] метод кроссвейвлетного анализа был применен для определения коррелированности и фазовых соотношений между временными рядами в различных спектральных и временных интервалах. Результаты кроссвейвлетного преобразования по методике [21] представлены на рис. 26 (предварительно из ряда ОСО были исключены линейный тренд и годовая гармоника). Область высоких значений совместной мощности, обведенная жирной линией, соответствует достоверной вероятности, превышающей 95%. Если для определенности рассмотреть фазовые соотношения для периода 120 мес., то направление стрелок (вниз) указывает, что вариации ОСО до 1955–1960 гг. отстают от вариаций уровня СА на  $90^\circ$  (примерно 30 мес.). В 1965–1985 гг. вариации ОСО и  $R_i$  близки к синфазным (стрелки направлены вправо), а в дальнейшем вариации ОСО начинают опережать вариации  $R_i$  (стрелки направлены вверх) и в конце анализируемого интервала близки к противофазным по отношению к  $R_i$  вариациям. Сопоставление результатов композитного и кроссвейвлетного анализа показывает достаточно хорошее согласие, что подтверждает достоверность оценок, получаемых методом композитных рядов. Следует отметить также, что соотношения фаз ко-

лебаний, близкие приведенным на рис. 2а, были получены также при анализе данных ст. Ароза за период с 1931 по 2002 гг. при использовании метода SSA (Singular Spectrum Analysis) в работе [22].

Изменчивость со временем фазовых соотношений между КДВ ОСО и уровнем СА позволяет объяснить ряд противоречивых результатов, полученных ранее при анализе данных ст. Ароза. Если подсчитать коэффициент корреляции  $R$  между КДВ общего содержания озона и уровнем СА за весь период 1932–2012 гг., то при нулевой задержке он положителен и равен всего 0.2. Это обусловлено разными знаками фазовых сдвигов до и после 1970 г. Фазовые задержки, при которых коэффициенты корреляции максимальны для каждого из 17-го по 23-й солнечных циклов с, равны  $-24$ ,  $-26$ ,  $-22$ ,  $-1$ ,  $19$ ,  $18$ ,  $22$  мес. соответственно (минус означает, что фаза КДВ ОСО отстает от  $R_i$ ). Соответствующие коэффициенты корреляции равны 0.54, 0.52, 0.65, 0.91, 0.96, 0.93, 0.83. Очевидно, что для интервала времени с 1932 по 1970 гг. коэффициенты корреляции будут максимальны при отставании вариаций ОСО от  $R_i$  на 2–3 года, а для данных, охватывающих 80-е годы, фазовый сдвиг между ОСО и  $R_i$  будет статистически незначим (см. например, [23, 24]).

В [5] было отмечено, что на оценку фазовых соотношений между озоном и уровнем СА в области квазидесятилетних колебаний возможное влияние могли оказать извержения вулканов. В общем случае учет такого влияния достаточно затруднителен. Согласно [25] очень слабое влияние извержения вулкана Эль-Чичон на вариации ОСО на ст. Ароза было заметно два сезона (с зимы 1982 г. по весну 1983 г.), а более сильное влияние вулкана Пинатубо (от  $-3$  ед. летом до  $-12$  ед. зимой) наблюдалось 6 сезонов (в 1992 г. и в первой половине 1993 г.). Представленные в [25] данные были использованы нами для корректировки значений ОСО в 1992–1993 гг. и сопоставления композитного ряда, приведенного на рис. 2а, и композитного ряда, полученного по скорректированным значениям ОСО. Для скорректированного ряда наблюдается задержка фазы экстремумов КДВ ОСО в 1989–2002 гг. примерно на 5–7 месяцев, а вне этого периода положение экстремумов ОСО не изменилось.

### 3.2. Солнечная активность и КДВ метеорологических параметров

Так же как и для рядов ОСО и  $R_i$ , композитные ряды, содержащие колебания с периодами от 8 до 13 лет, были составлены по данным за 1949–2012 гг. для меридиональной и зональной компонент скорости ветра, температуры и геопотенциальной высоты изобарических поверхностей в слое от 10 до 925 гПа. Для примера на рис. 3 показаны композитные ряды меридиональной скорости ветра,

температуры и геопотенциальной высоты для уровней 50 и 200 гПа в сравнении с индексом солнечной активности. Временной ход КДВ НР на уровне 50 гПа достаточно хорошо согласуется с результатами работы [26], в которой при помощи метода EMD (Empirical Mode Decomposition) анализировались вариации НР в 1958–2002 гг. на уровне 30 гПа.

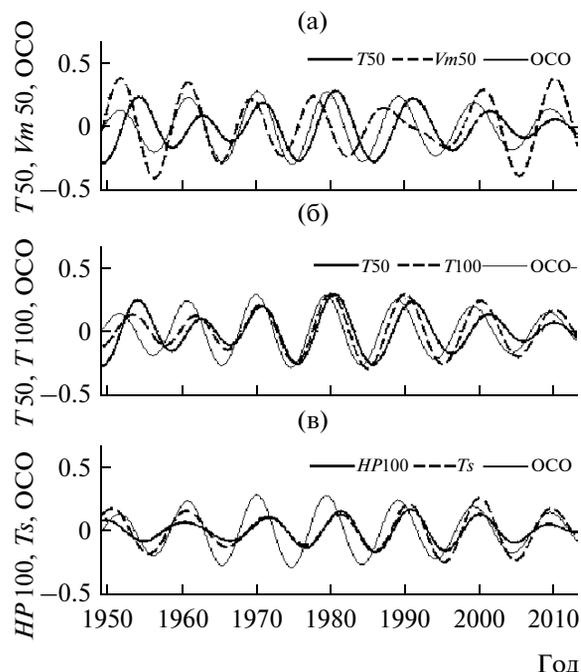
Хотя фазы максимумов КДВ метеопараметров варьируют с высотой и во времени, в отдельные периоды времени максимумы КДВ совпадали с максимумами солнечных циклов. В таблице приведены годы начала и годы максимумов солнечных циклов [27] и указаны уровни давления, на которых максимумы КДВ метеопараметров примерно совпадали с максимумами солнечной активности.

Эти данные носят качественный характер, поскольку фаза максимума данного параметра на одном уровне давления могла совпадать с началом, а на других уровнях — с серединой или концом фазы максимума СА, которая обычно продолжается 3–4 года. Тем не менее приведенные в таблице результаты дополняют рис. 3 и позволяют составить представление об изменчивости фазовых соотношений с высотой и временем. Например, в 20-м и 23-м циклах (с промежутком в 30 лет) на всех высотах совпадали по фазе вариации меридиональной скорости ветра и уровня солнечной активности. Как и для ОСО (рис. 2), в 20-м цикле совпадали с вариациями уровня СА колебания температуры и геопотенциальной высоты на уровнях 10–100 гПа и почти на всех уровнях — колебания зональной и меридиональной скоростей ветра. В трех циклах (21–23) в достаточно большом слое атмосферы совпадали с вариациями СА колебания температуры и геопотенциальной высоты. Хотя на многих высотах фаза максимумов метеопараметров в 1999–2001 гг. совпала с максимумом предыдущего 23-го цикла СА, следующий максимум НР (10–200 гПа),  $T$  (50–925 гПа),  $Vm$  (10–925 гПа) наблюдался в 2008–2010 гг. и был приблизительно в противофазе с вариациями уровня СА. Для вариаций  $Vz$  в 2005–2006 гг. на уровнях 10–70 гПа наблюдался максимум, а на более низких уровнях — минимум.

В целом, для КДВ температуры и характеристик атмосферной циркуляции, так же как и для ОСО, характерна более короткопериодная изменчивость, чем для вариаций уровня солнечной активности. Аналогичный вывод был получен в [28] при анализе вариаций ОСО и метеопараметров в широтном поясе 45°–50° N.

### 3.3. Сопоставление КДВ ОСО и метеопараметров

**ОСО, температура и меридиональный ветер.** Квазидесятилетние колебания меридиональной



**Рис. 4.** а – КДВ температуры ( $T_{50}$ ), меридионального скорости ветра ( $Vm$  50) на изобарической поверхности 50 гПа и ОСО. б – КДВ температуры на изобарических поверхностях 50 и 100 гПа и ОСО. в – КДВ геопотенциальной высоты (НР100), средней температуры  $T_s$  в слое 100–925 гПа и ОСО. Значения НР уменьшены в 100 раз, значения ОСО на всех рисунках уменьшены в 15 раз.

скорости имеют относительно стабильное расположение максимумов и минимумов на всех высотах, за исключением периода с 1990 по 2000 гг., когда в слое 100–500 гПа наблюдался дополнительный максимум. Наибольшие коэффициенты корреляции меридиональной скорости ветра и ОСО наблюдаются в слое 20–50 гПа. Сопоставление КДВ меридиональной скорости ветра и температуры на уровнях 30–50 гПа показало, что в период с 1949 по 2000 гг. наблюдалось достаточно стабильное соотношение положений экстремумов этих параметров. Например, для уровня 50 гПа (рис. 4а) максимальные коэффициенты корреляции (более 0.6 при доверительной вероятности 99%) наблюдаются при положительных или отрицательных задержках  $27 \pm 3$  мес., примерно соответствующих четверти среднего периода колебаний температуры. Это означает, что максимумы (минимумы) меридиональной скорости ветра близко совпадают по времени с периодами максимальной скорости роста (уменьшения) температуры. Интересной особенностью является величина фазового сдвига (27 мес.), примерно соответствующая среднему периоду квазидвухлетних колебаний скорости зонального стратосферного ветра над экватором. Этот результат требует дополнительного изучения при анализе соответ-

ствующих параметров атмосферы в других широтных зонах.

Квазидесятилетние вариации температуры в слое 50–200 гПа происходят практически в фазе, а максимумы КДВ температуры отстают от максимумов ОСО на 1–3 года. Ниже и выше этого слоя фазы колебаний различаются. КДВ ОСО и температуры на изобарических поверхностях 50 и 100 гПа приведены для примера на рис. 4б. В период с 1949 по 2005 гг. фазовая задержка вариаций температуры относительно вариаций ОСО составляет 20–30 мес. Такие фазовые соотношения могут быть обусловлены как динамическими, так и фотохимическими процессами. Минимумы температуры над ст. Ароза соответствуют максимальному градиенту температуры между экватором и средними широтами. Это приводит к росту меридиональной скорости ветра и, возможно, интенсификации циркуляционной ячейки, схожей с циркуляцией Брюера–Добсона, только на временном масштабе, соответствующем квазидесятилетним колебаниям. В период минимумов температуры процесс переноса озона из тропиков в средние и высокие широты усиливается, общее содержание озона растет. В дальнейшем при увеличении температуры меридиональный градиент температуры и перенос озона уменьшаются, рост ОСО прекращается и достигает максимума в моменты, примерно соответствующие максимальной скорости роста температуры. В то же время с ростом температуры возрастает скорость фотохимических процессов, приводящих к разрушению озона. Периоды, когда скорость роста температуры максимальна, примерно совпадают с периодами прекращения роста озона, а периоды максимумов температуры – с периодами максимальной скорости падения ОСО. В среднем изменение температуры на 0.2 К приводит через 1–2 года к росту озона на 1%.

**ОСО, геопотенциальная высота и температура.** КДВ геопотенциальной высоты на всех высотах, кроме нижней тропосферы (500 и 925 гПа), в среднем отстают по фазе от вариаций ОСО на 1.5 года. Наибольшие коэффициенты корреляции ( $>0.9$ ) наблюдаются на уровнях 30 и 50 гПа. Фазовая задержка вариаций геопотенциальной высоты относительно вариаций ОСО в среднем близка к фазовым задержкам для температуры, и можно предположить, что вариации *НР* должны быть близки к вариациям температуры. Однако с течением времени фазовый сдвиг между максимумами *НР* и температуры изменяется, что приводит к низким значениям коэффициентов корреляции. Причина этого, вероятно, заключается в том, что геопотенциальная высота на уровне постоянного давления пропорциональна средней температуре нижележащего слоя. В качестве примера на рис. 4в приведены КДВ геопотенциальной высоты поверхности 100 гПа, а также КДВ средней темпера-

туры в слое между 925 и 100 гПа. Вариации *НР* и средней температуры хорошо соответствуют друг другу для всего анализируемого периода (при нулевой задержке коэффициент корреляции превышает 0.9).

**ОСО и зональный ветер.** КДВ зональной скорости ветра примерно согласованы между собой только выше уровня 200 гПа. Фазовые соотношения с КДВ ОСО в течение рассматриваемого периода времени значительно изменяются. В среднем максимумы КДВ зональной скорости ветра опережают максимумы ОСО, а коэффициенты корреляции варьируют от 0.2 до 0.7 при фазовом сдвиге от 1 до 3 лет.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты анализа фазовых соотношений между квазидесятилетними вариациями уровня солнечной активности и общим содержанием озона и различными параметрами нижней стратосферы и тропосферы (температура, меридиональная и зональная составляющие скорости ветра, геопотенциальная высота) показали, что в целом для квазидесятилетних колебаний ОСО и метеорологических параметров характерна более короткопериодная изменчивость, чем для вариаций уровня солнечной активности.

До середины 60-х годов прошлого столетия максимумы квазидесятилетних колебаний ОСО отстают на 2–3 года от максимумов уровня СА. В 20-м цикле СА (1964–1976 гг.) фазы КДВ ОСО и СА почти совпадали. В дальнейшем максимумы ОСО начинают опережать максимумы уровня СА. В последнее десятилетие, начиная со снижения уровня СА в 23-м цикле, вариации ОСО происходят приблизительно в противофазе с вариациями СА.

Для квазидесятилетних вариаций температуры и характеристик атмосферной циркуляции характерна изменчивость с высотой. В период 1949–2012 гг. наибольшее число совпадений с фазой максимума СА наблюдалось для температуры на уровне 50 гПа. В 1977–2002 гг. (21–23-й циклы СА) в значительном слое атмосферы были близки к вариациям уровня СА вариации температуры и геопотенциальной высоты. Интересно, что в предыдущем 23-м цикле с фазой максимума СА совпадали (но не на всех уровнях) максимумы многих метеорологических параметров. Однако очередной максимум КДВ большинства метеопараметров наступил вблизи минимума затянувшегося 23-го цикла СА в 2009–2010 гг. С начала 24-го цикла СА вариации температуры (50–925 гПа), геопотенциальной высоты (10–200 гПа) и меридиональной скорости ветра (10–925 гПа) происходили приблизительно в противофазе с вариациями уровня СА.

Следует отметить также некоторые закономерности фазовых соотношений между квазидесятилетними вариациями ОСО, температуры и циркуляционных характеристик. В слое 50–100 гПа периоды, когда скорость роста температуры максимальна, примерно совпадают с периодами прекращения роста ОСО, а периоды максимумов температуры – с периодами максимальной скорости уменьшения ОСО. Максимумы (минимумы) КДВ меридиональной скорости ветра близки по времени к периодам максимальной скорости роста (уменьшения) температуры. Максимальные коэффициенты корреляции наблюдаются на уровне 50 гПа при положительных и отрицательных фазовых задержках, примерно равных 27 мес. Величина фазовой задержки близка к среднему периоду квазидвухлетней цикличности экваториального стратосферного ветра. Поэтому представляется интересным анализ соотношений между КДВ озона, температуры и меридиональной скорости ветра на других широтах.

Вариации геопотенциальной высоты хорошо соответствуют вариациям средней температуры нижележащего слоя атмосферы и на всех высотах, кроме нижней тропосферы, отстают от вариаций ОСО в среднем на 1.5 года. КДВ зональной скорости ветра согласованы между собой по фазе только выше изобарической поверхности 200 гПа, в среднем максимумы КДВ зонального ветра опережают максимумы ОСО.

Основные соотношения между вариациями уровня солнечной активности, температуры, меридиональной и зональной скоростей ветра и геопотенциальной высоты указывают на достаточно сложный характер изменчивости различных характеристик нижней стратосферы и тропосферы, обусловленный, вероятно, не только прямым воздействием вариаций уровня солнечной активности на физические и химические атмосферные процессы, но и обратными связями, влияющими на температуру и газовый состав атмосферы [29].

Следует отметить, что приведенные выше результаты, к сожалению, основаны на единственном длительном ряде измерений ОСО на ст. Ароза, охватывающем почти 8 солнечных циклов. Данные других озонметрических станций включают в период, предшествующий 70-м годам, в лучшем случае только один максимум солнечной активности. Вместе с тем, использование осредненных (среднезональных) спутниковых данных с 1979 по 2013 гг. [28] для анализа КДВ ОСО подтвердило основные закономерности настоящей работы, в частности, вывод, что вариации КДВ ОСО для средних широт Северного полушария, где находится ст. Ароза, в последнее десятилетие близки к противофазным с вариациями уровня солнечной активности.

Представленные в работе временные и фазовые соотношения между общим содержанием озона, различными метеорологическими параметрами и 11-летним циклом солнечной активности могут найти применение при разработке химико-климатических моделей нижней атмосферы.

Автор признателен коллективам ученых NCEP-NCAR, NASA, NOAA, WOUDC, SIDC за возможность доступа к созданным ими базам данных, а также рецензенту и научному редактору, замечания которых позволили в значительной степени улучшить содержание статьи. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №№ 14-05-00127, 14-05-00113).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Roy J. The role of the Sun in atmosphere–ocean coupling // *Int. J. Climatol.* 2013, doi: 10.1002/joc.3713.
2. Zhou J.S., Tung K.K. Observed tropospheric temperature response to 11-yr solar cycle and what it reveals about mechanisms // *J. Atmos. Sci.* 2013. V. 70. P. 9–14, doi: 10.1175/JAS-D-12-0214.1.
3. Anet J.G., Rozanov E.V., Muthers S. et al. Impact of a potential 21st century “grand solar minimum” on surface temperatures and stratospheric ozone // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40. P. 4420–4425, doi:10.1002/rl.50806.
4. Ermolli I., Matthes K., Dudok de Wit T. et al. Recent variability of the solar spectral irradiance and its impact on climate modelling // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 3945–3977, doi:10.5194/acp-13-3945-2013.
5. Груздев А.Н. Оценка влияния 11-летнего цикла солнечной активности на содержание озона в стратосфере // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 2014. Т. 54. № 5. С. 678–684.
6. Harder J.W., Fontenla J.M., Pilewskie P. et al. Trends in solar spectral irradiance variability in the visible and infrared // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. L07801, doi:10.1029/2008GL036797.
7. Gray L.J., Beer J., Geller M. et al. Solar influences on climate // *Rev. Geophys.* 2010. V. 48. RG4001, doi: 10.1029/2009RG000282.
8. WMO, 2011. World Meteorological Organization, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010, WMO Global Ozone Research and Monitoring Project – Report No. 52, 2011.
9. Груздев А.Н., Брассёр Г.П. Воздействие 11-летнего цикла солнечной активности на характеристики годового хода общего содержания озона // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2007. Т. 43. № 3. С. 379–391.
10. Вишератин К.Н., Кузнецов В.И. Пространственно-временные вариации фазы основных колебаний общего содержания озона по данным спутниковых измерений TOMS-SBUV // *Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса.* 2012. Т. 9. № 2. С. 192–199.
11. Вишератин К.Н. Межгодовые вариации и тренды среднезональных рядов общего содержания озона, температуры и зонального ветра // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2007. Т. 43. № 4. С. 67–85.
12. Вишератин К.Н. Фазовые соотношения между квазидесятилетними колебаниями общего содер-

- жания озона и 11-летним циклом солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. 2012. Т. 52. № 1. С. 99–108.
13. WOUDC, 2013. World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre operated by Environment Canada, Toronto, Ontario, Canada.
  14. Kistler R., Kalnay E., Collins W. et al. The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2001. V. 82. P. 247–268.
  15. SIDC-team, 2013. World Data Center for the Sunspot Index, Royal Observatory of Belgium, (<http://www.sidc.be/sunspot-data>).
  16. Scargle J.D. Studies in astronomical time series analysis. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // Astroph. J. 1982. V. 263. P. 835–853.
  17. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
  18. Вишератин К.Н., Карманов Ф.И. Практические методы оценивания спектральных параметров. Обнинск.: ИАТЭ, 2008. 60 с.
  19. Baluev R.V. Assessing statistical significance of periodogram peaks // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2008. V. 385. № 3. P. 1279–1285.
  20. Blackman R.B., Tukey J.W. The Measurement of power spectra from the point of view of communications engineering – Pt II // Bell System Technical J. 1958. V. 37. P. 485–569.
  21. Grinsted A., Moore J.C., Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series // Nonlin. Process. Geophys. 2004. № 11. P. 561–566, doi:10.5194/npg-11-561-2004.
  22. Camp Ch.D. Temporal and spatial patterns of the inter-annual variability of stratospheric ozone and dynamics. Thesis for degree of Doctor of Philosophy. Pasadena: California Institute of Technology, 2004. 185 p.
  23. Angell J.K., Korshover J. Quasi-biennial and long-term fluctuations in total ozone // Mon. Weath. Rev. 1973. V. 101. № 5. P. 426–443.
  24. Kane R.P. Long term variation of total ozone // Pa-geoph. 1988. V. 127. № 1. P. 143–154.
  25. Rieder H.E., Staehelin J., Maeder J.A. et al. Extreme events in total ozone over Arosa – Pt 2: Fingerprints of atmospheric dynamics and chemistry and effects on mean values and long-term changes // Atmos. Chem. Phys. 2010. V. 10. P. 10033–10045, doi:10.5194/acp-10-10033-2010.
  26. Coughlin K.T., Tung K.K. 11-Year solar cycle in the stratosphere extracted by the empirical mode decomposition method // Adv. Space Res. 2004. V. 34. P. 323–329.
  27. Hathaway D.H. The solar cycle // Living Rev. Solar Phys. 2010. V. 7. [Online Article], <http://www.livingreviews.org/lrsp-2010-1>.
  28. Вишератин К.Н. Квазидесятилетние вариации среднеглобальных и среднезональных значений общего содержания озона и некоторых параметров нижней стратосферы // Тез. докл. Межд. симп. МСАРД–2015. 23–26 июня 2015 г., СПб.-Петродворец. С. 289–290.
  29. Смышляев С.П., Мареев Е.А., Галин В.Я., Блакитная П.А. Моделирование непрямого влияния одиннадцатилетнего цикла солнечной активности на газовый состав атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 5. С. 672–684.

## Quasi-Decadal Variations in Total Ozone Content, Wind Velocity, Temperature, and Geopotential Height over the Arosa Station (Switzerland)

K. N. Visheratin

*Institute of Experimental Meteorology, Taifun Research and Production Association,  
ul. Pobedy 4, Obninsk, 249038 Russia  
e-mail: kvisher@rpatyphoon.ru*

Received November 20, 2014; in final form, May 22, 2015

**Abstract**—We present the results of the analysis of the phase relationships between the quasi-decadal variations (QDVs) (in the range from 8 to 13 years) in the total ozone content (TOC) at the Arosa station for 1932–2012 and a number of meteorological parameters: monthly mean values of temperature, meridional and zonal components of wind velocity, and geopotential heights for isobaric surfaces in the layer of 10–925 hPa over the Arosa station using the Fourier methods and composite and cross-wavelet analysis. It has been shown that the phase relationships of the QDVs in the TOC and meteorological parameters with an 11-year cycle of solar activity change in time and height; starting with cycle 24 of solar activity (2008–2010), the variations in the TOC and a number of meteorological parameters occur in almost counter phase with the variations in solar activity. The periods of the maximum growth rate of the temperature at isobaric surfaces 50–100 hPa nearly correspond to the TOC's maximum periods, and the periods of the maximum temperature correspond the periods of the decrease of the peak TOC rate. The highest correlation coefficients between the meridional wind velocity and temperature are observed at 50 hPa at positive and negative delays of ~27 months. The times of the maxima (minima) of the QDVs in the meridional wind velocity nearly correspond to the periods of the maximum amplification (attenuation) rate of the temperature of the QDVs. The QDVs in the geopotential heights of isobaric surfaces fall behind the variations in the TOC by an average of 1.5 years everywhere except in the lower troposphere. In general, the periods of variations in the TOC and meteorological parameters in the range of 8–13 years are smaller than the period of variations in the level of solar activity.

**Keywords:** ozone, temperature, zonal wind, meridional wind, geopotential height, the 11-year cycle of solar activity, the method of composite series