

## СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ВАРИАЦИЙ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЕВРАЗИИ

© 2006 г. К. Н. Вишератин\*, Н. Е. Каменоградский\*, Ф. В. Кашин\*, В. К. Семенов\*\*,  
В. П. Синяков\*\*, Л. И. Сорокина\*\*

\*Научно-производственное объединение “Тайфун”, г. Обнинск, Россия  
249038 Обнинск, Калужская, обл., просп. Ленина, 82  
kvisher@typhoon.obninsk.ru

\*\*Киргизский государственный национальный университет, г. Бишкек, Киргизская республика  
svk@elcat.kg

Поступила в редакцию 01.12.2004 г., после доработки 06.06.2005 г.

Представлены результаты многолетних (1980–2003 гг.) систематических измерений общего содержания озона на станции Иссык–Куль (42.6° N, 77.0°, 1650 м над ур. м.). Определены статистические характеристики и спектральная структура вариаций общего содержания озона и основные тенденции изменчивости во времени. Выявлено, что уменьшение общего содержания озона в 1980–2003 гг. происходило со средней скоростью  $(-1.29 \pm 0.08)$  е.Д. в год. Результаты Фурье-анализа и вейвлетного анализа показали, что только колебания с периодами 12, 27–29 и 102–105 месяцев являются сравнительно стабильными и могут быть представлены в виде гармонических колебаний. Колебания с периодами менее 6 месяцев имеют характер периодически возникающих пульсаций. Среди них можно выделить колебания с периодами 27–29 и 34–37 дней. Отмечено хорошее согласие спектрально-временных структур вариаций общего содержания озона, полученных на основании наземных измерений на станции Иссык-Куль и на основании спутниковых измерений TOMS.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время оперативный контроль общего содержания озона (ОСО) в атмосфере осуществляется в основном по результатам спутниковых измерений TOMS. Результаты наземных озонных станций дополняют и уточняют спутниковые измерения и предоставляют информацию о региональных особенностях изменений ОСО.

Исследования временной изменчивости ОСО в последние 10–15 лет в основном обусловлены задачами выявления долговременных вариаций и разработки прогностических моделей. Эти задачи возникли в связи с истощением озонового слоя, наблюдаемым с 80-х годов прошлого столетия и особенно отчетливым во внетропических широтах. В средних широтах Северного полушария долговременные изменения ОСО состоят из периода почти линейного уменьшения с конца 70-х до начала 90-х годов, периода минимальных значений в 1992–1994 гг. и периода роста во второй половине 90-х годов [1]. На эти изменения, причины которых в настоящее время являются предметом дискуссий, накладываются сезонные колебания и вариации с периодом более года. Последние вариации чаще всего связывают с квазипериодической перестройкой полей ветра в верхней тро-

посфере и нижней стратосфере экваториальной части земного шара, процессами перестройки полей температуры и давления в Тихом океане и солнечной активностью [1–28]. Ряд дополнительных факторов, влияющих на долговременные вариации ОСО, рассмотрен в [29–56]. Это вариации углового атмосферного момента, трансформация центров действия атмосферы, влияние вулканической активности, вариации межпланетного магнитного поля и потока галактических космических лучей и относительно стабильные крупномасштабные тропосферные и стратосферные циркуляционные процессы, описываемые различными индексами.

Короткопериодные вариации ОСО с периодами от нескольких дней до нескольких месяцев исследованы в меньшем числе работ. Возникновение этих вариаций (иногда со значительной амплитудой) обычно связывают с адвекцией воздушных масс, с генезисом и трансформацией тропосферных и стратосферных циклонических образований, со струйными течениями, а также с солнечной активностью [1, 4, 16, 37–44, 55, 56].

В данной работе исследована спектрально-временная структура вариаций ОСО в атмосфере над центральной частью Евразии (Северный Тянь-Шань) на основе анализа результатов мно-

голетних измерений на станции Иссык-Куль (ст. И-К). Ст. И-К входит в мировую озонометрическую сеть под № 347 и ее данные поступают в Канаду, в Мировой центр данных по озону и УФ радиации.

Ранее вариации содержания атмосферного озона в изучаемом районе были проанализированы в [57–60]. Результаты, полученные на станции И.-К. в период 1980–1998 гг., и результаты их анализа методом быстрого Фурье преобразования (FFT) приведены в [57]. Для построения эмпирической модели долговременных изменений ОСО в [57] использованы основные длиннопериодные колебания ОСО. В [58] высказано предположение о том, что некоторые гармоники колебаний ОСО являются мультиплетными структурами. В [59, 60] с помощью вейвлетного анализа выявлены особенности изменений со временем некоторых длиннопериодных гармоник колебаний ОСО.

В данной работе продолжены исследования основных статистических характеристик и спектральной структуры длиннопериодных (здесь к ним формально отнесены колебания с периодами 6 и более месяцев) и короткопериодных (с периодами от нескольких дней до полугода) вариаций ОСО. Авторы анализируют среднедневные и среднемесячные значения ОСО за период 1980–2003 гг.

## РАЙОН И УСЛОВИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Станция Иссык-Куль расположена в центральной части Евразии (42.6°N, 77.0°E, 1650 м над уровнем моря) на северном берегу высокогорного озера Иссык-Куль. Озеро находится в Иссык-Кульской котловине – одной из самых больших межгорных впадин Тянь-Шаня, окруженной с севера и юга горными массивами высотой 4700–5300 м. Котловина вытянута с запада на восток более чем на 250 км и в ширину достигает 100 км. Общая площадь котловины около 23 тыс. км<sup>2</sup>, из них 6292 км<sup>2</sup> приходится на водную поверхность озера Иссык-Куль.

Измерения ОСО на ст. И.-К. проводятся спектрофотометрической установкой (СФСУ) многоволновым методом [61]. Случайная погрешность единичного измерения ОСО составляет ±0.6%. Для определения систематической погрешности измерений и привязки данных к мировой озонометрической шкале были проведены синхронные сверочные измерения со спектрофотометрами Добсона № 108 (Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова) и Брюэра № 44 (ГУ НПО “Тайфун”). Спектрофотометр Брюэра № 44 откалиброван по вторичному международному эталону – спектрофотометру Брюэра № 17. Систематические отклонения результатов измерений ОСО установкой СФСУ и спектрофотоме-

трами Добсона № 108 и Брюэра № 44 не превышают 2% [57].

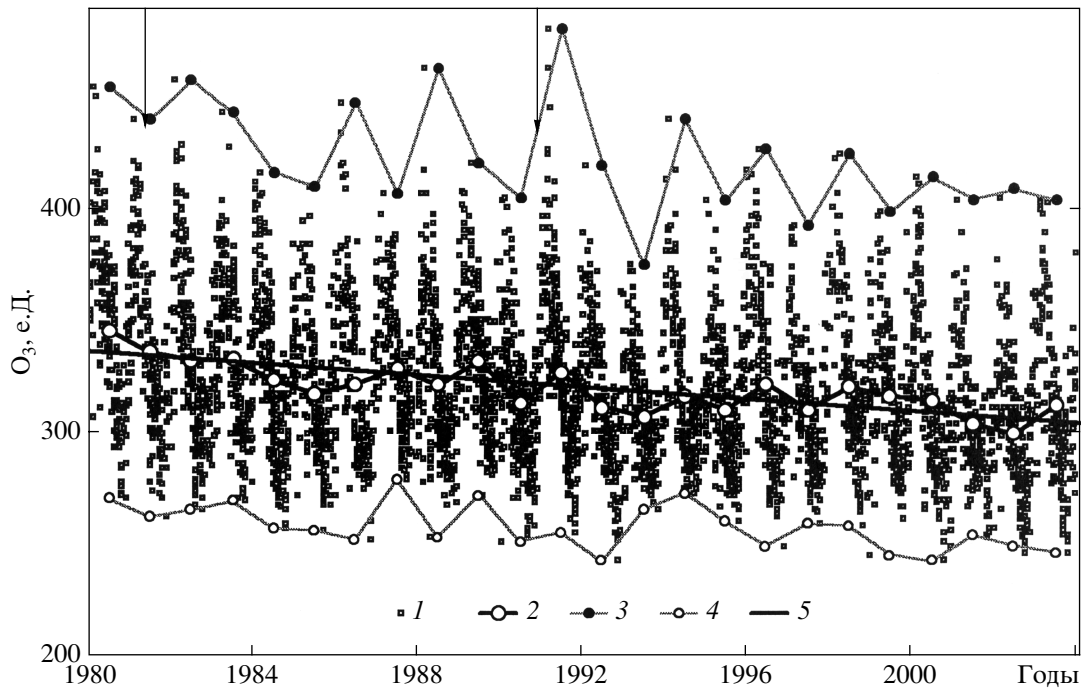
В районе ст. И.-К. погодные условия позволяют проводить измерения ОСО в течение 46% календарных дней ноябре–марте и в течение более чем 70% календарных дней в апреле–октябре. Для определения ОСО регистрируются спектры прямого солнечного излучения в ясную погоду и при переменной облачности, когда облака удалены от диска Солнца на угол не менее 10°. Спектры записываются сериями, состоящими из пяти пар. Каждая пара включает спектральный диапазон (301–322) нм, регистрируемый при сканировании в направлении уменьшения и направлении увеличения длин волн. Продолжительность записи одной серии составляет 5 минут. Серии измерений записываются с интервалами 1 час. За день при ясной погоде в зависимости от времени года записывается от 3-х до 9-ти серий. Для определения среднего за день значения ОСО используются не менее двух серий (10 пар спектров), зарегистрированных при зенитных углах Солнца не более 71°. Средние за месяц величины ОСО представляются собой среднее арифметическое среднедневных значений, полученных в течение данного месяца, так как дни наблюдений распределены в течение месяца достаточно равномерно.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты измерений ОСО представлены двумя массивами данных. Первый массив содержит среднедневные значения (в единицах Добсона, е.Д.) для 8766 дней (01.01.1980 г. – 31.12.2003 г.) с неравномерно распределенными перерывами (дни, неблагоприятные для измерений по погодным условиям). Второй массив содержит среднемесячные значения ОСО для 288 месяцев (01.1980 г. – 12.2003 г.) и не имеет перерывов.

Результаты измерений общего содержания озона за период с 1980 по 2003 гг. показаны на рис. 1. В последовательности среднегодовых значений можно выделить три интервала времени (кривая 2) с особенно заметным падением ОСО: 1980–1985, 1989–1993 и 1998–2002. Уменьшение ОСО за весь анализируемый период соответствует линейному отрицательному тренду  $-1.29 \pm 0.08$  е.Д. в год ( $-0.38\%/год$ ). Такой тренд характерен для ОСО в средних широтах Северного полушария [1]. В 1980–2003 гг. экстремальные значения ОСО тоже снижались (кривые 3 и 4 на рис. 1): тренды минимальных и максимальных значений составили  $-0.75 \pm 0.25$  и  $-1.9 \pm 0.5$  е.Д. в год соответственно.

Амплитуда вариаций среднегодовых значений ОСО не превышает 10 е.Д., амплитуда колебаний  $X_{min}$  (минимальное значение за год) составляет около 15 е.Д., а амплитуда максимальных значе-



**Рис. 1.** Среднедневные результаты измерений ОСО (1) на станции И.-К. Среднегодовые (2), максимальные в данный год (3) и минимальные в данный год (4) значения ОСО нанесены на график в середине календарного года. Сплошная линия (5) – тренд.

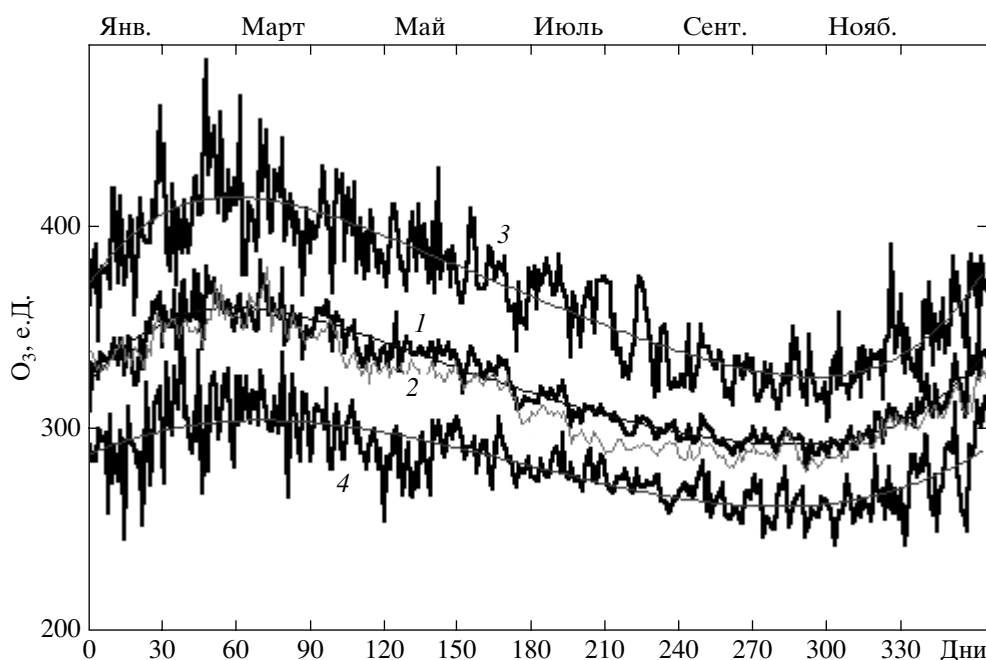
ний  $X_{\max}$  достигает 50 е.Д. (здесь и далее амплитуды соответствуют половинному значению от полного размаха колебаний). Отметим, что амплитуда колебаний максимальных значений ОСО до 1991 г. увеличивалась. Из рис. 1 также видно, что средние, максимальные и минимальные значения ОСО имеют примерно 2–3-летнюю периодичность.

В течение года наиболее высокие амплитуды вариаций минимальных и особенно максимальных значений ОСО наблюдаются в феврале–марте, когда в течение одного–трех дней значения ОСО могут изменяться на 100 е.Д. Например, абсолютное максимальное значение ОСО наблюдалось 17 февраля 1991 г. (478 е.Д.), а уже 19 февраля содержание озона составляло 376 Е.Д. Минимумы или экстремально низкие содержания озона [1, 4] представляют особый интерес в связи с опасностью воздействия биологически активной УФ радиации. Как отмечалось ранее [57], в течение отдельных месяцев, чаще всего в ноябре, на станции И.-К. на фоне обычных сезонных вариаций ОСО наблюдаются пониженные значения ОСО. Подобные аномалии в [4] были связаны с вторжениями тропических воздушных масс в средние широты, а в [34] была обнаружена корреляция между периодичностью кратковременных отрицательных аномалий ОСО и фазой Северо-Атлантического колебания.

Вариации ОСО во времени имеют ярко выраженный сезонный ход, с разностью от 130 до

230 е.Д. между минимальными и максимальными значениями. Минимальная амплитуда сезонных колебаний ОСО наблюдалась в 1993 г., максимальная – в 1988 и 1991 гг. На рис. 2 приведены результаты, усредненные за весь период измерений: средние значения за каждый день года, усредненные по всему периоду измерений, и максимальные и минимальные значения в каждый календарный день года. Сезонный ход ОСО на станции Иссык-Куль типичен для средних широт Северного полушария [1]: сравнительно быстрый рост ОСО происходит в течение 4-х – 5-ти месяцев с ноября–декабря по февраль–март, и затем вплоть до октября наблюдается медленное снижение ОСО в течение 7–8 месяцев. Короткопериодные вариации ОСО наиболее значительны поздней осенью и особенно в зимне-весенний период. Хотя минимальные концентрации озона характерны в основном для осеннего периода, значения ОСО, близкие к минимальным, могут кратковременно наблюдаться и в зимний период. Особенностью сезонного хода является также весенний (март–май) минимум содержания озона, наблюдаемый не каждый год и более заметный на рис. 2 на нижней кривой.

Сопоставление результатов наземных (И.-К.) и спутниковых измерений (данные TOMS, версия 7 за 1980–1993 и 1996–2003 гг. [62]) показало, что разовые расхождения между дневными значениями в отдельные дни достигают 13%, среднее от-

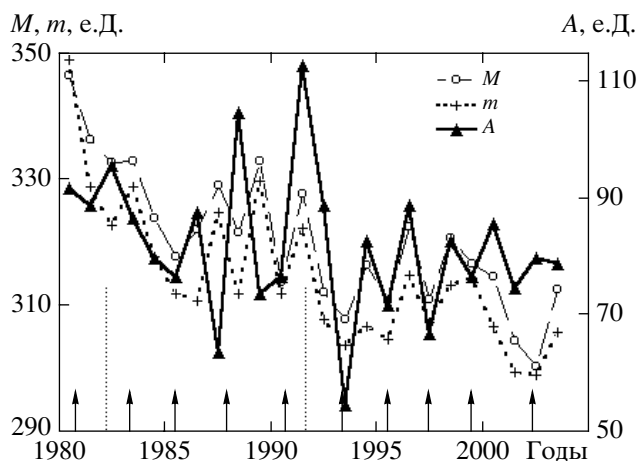


**Рис. 2.** Сезонный ход ОСО. 1 и 2 – средние за данный день календарного года значения ОСО в период с 1980 по 2003 г. по данным ст. И.-К. и по данным TOMS соответственно, 3 – максимальные значения и 4 – минимальные значения ОСО за данный день года по данным ст. И.-К.

клонение равно  $-0.5\%$  (в среднем за год результаты, полученные на И.-К., выше на полпроцента чем результаты TOMS).

### ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАРИАЦИЙ ОСО

Для расчетов общестатистических характеристик временного ряда измерений ОСО, выпол-



**Рис. 3.** Среднегодовые значения общего содержания озона ( $M$ ), медиана ( $m$ ) и амплитуда колебаний ( $A$ ) для каждого календарного года от 1980 до 2003 г. Стрелки в нижней части графика отмечают максимумы западной фазы экваториального стратосферного ветра на уровне 30 мб, штриховые линии – моменты извержения вулканов Эль-Чичоне и Пинатубо.

ненных на ст. И.-К., и для построения функций распределения мы использовали стандартные алгоритмы [63, 64]. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Межгодовые вариации среднего значения ОСО, медианы и максимальной амплитуды колебаний показаны на рис. 3, а межгодовые вариации коэффициентов вариации, асимметрии и эксцесса – на рис. 4. Из рис. 3 следует, что значения всех представленных характеристик в течение всего периода измерений имели тенденцию к снижению. Отметим, что вариации медианы и вариации среднеарифметических среднегодовых значений ОСО ведут себя с течением времени синхронно. На рис. 3 обращает на себя внимание период 1992–1993 гг. Ранее уже упоминалось, что характер поведения максимальных значений ОСО после этого периода изменился. В течение этого периода изменилось и поведение амплитуды колебаний  $A$ . Если до 1992 г. амплитуда колебаний нарастала, то после 1993 г. размах колебаний уменьшился в несколько раз. В период 1992–1993 гг. уменьшились и среднегодовые значения ОСО и медианы.

Изменения коэффициентов вариации, асимметрии и эксцесса с течением времени показаны на рис. 4. В период 1992–1993 гг. поведение и этих коэффициентов тоже имело особенности. Например, коэффициент вариации, характеризующий отношение стандартного отклонения к среднему значению, имеет отрицательный тренд до 1993 г. и положительный тренд после 1993 г. В отличие от всех остальных статистических характеристик

**Таблица 1.** Общестатистические характеристики значений ОСО, измеренных в период 1980–2003 гг.

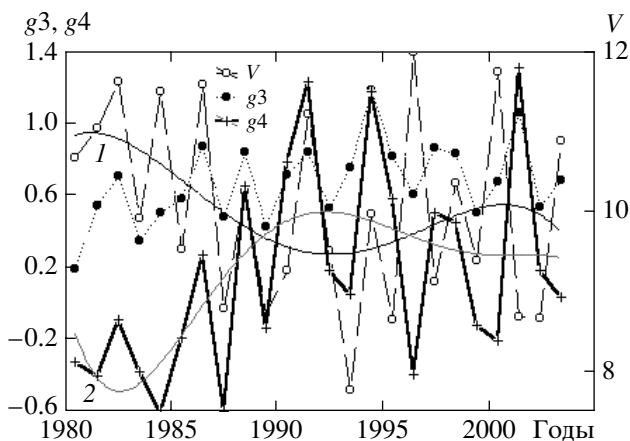
Год	$N$	$M$	$m$	$\mu$	$A$	$S$	$V$	$g_3$	$g_4$
1980	187	347	349	312	92	37	10.7	0.20	-0.32
1981	197	336	329	319	89	37	11.0	0.55	-0.40
1982	218	333	323	315	96	39	11.6	0.72	-0.09
1983	223	333	329	314	87	33	9.9	0.36	-0.37
1984	241	324	318	296	80	37	11.5	0.51	-0.60
1985	199	318	312	297	77	30	9.5	0.59	-0.19
1986	187	322	311	293	88	37	11.6	0.88	0.28
1987	176	329	325	307	64	29	8.8	0.49	-0.60
1988	256	322	312	302	105	33	10.2	0.85	0.66
1989	247	333	330	327	74	29	8.7	0.43	-0.13
1990	260	314	312	290	77	29	9.3	0.72	0.79
1991	280	328	322	312	113	37	11.2	0.84	1.24
1992	243	312	308	296	89	30	9.5	0.53	0.19
1993	212	308	304	298	55	24	7.8	0.76	0.06
1994	213	317	307	292	83	32	10.0	1.19	1.18
1995	258	311	305	296	72	27	8.6	0.82	0.59
1996	206	323	315	303	89	39	12.0	0.61	-0.39
1997	194	311	307	296	67	28	9.1	0.87	0.51
1998	172	321	313	304	83	33	10.4	0.84	0.46
1999	198	317	314	305	77	30	9.3	0.51	-0.12
2000	190	315	306	290	86	37	11.7	0.68	-0.20
2001	181	305	300	293	75	26	8.7	1.06	1.31
2002	215	301	299	301	80	29	8.7	0.54	0.19
2003	184	313	306	305	79	35	10.9	0.69	0.04
Среднее	214	320	315	303	83	32	9.6	0.68	0.17

Примечание. Здесь  $N$  – число дней измерений в календарном году,  $M$  – среднее значение ОСО за данный год (е. Д.),  $m$  – медиана (среднее значение накопленных частот, е. Д.),  $\mu$  – мода (наиболее вероятное значение, т.е. максимум на гистограмме распределения, е. Д.),  $A$  – максимальная амплитуда вариаций (половина разности между максимальными и минимальными значениями, е. Д.),  $S$  – стандартное отклонение (е. Д.),  $V = 100S/M$  – коэффициент вариации (%),  $g_3$  – характеристика третьего момента распределения или коэффициент асимметрии и  $g_4$  – характеристика четвертого момента распределения или коэффициент эксцесса. Значения указанных характеристик, осредненные по всему периоду измерений, даны в последней строке таблицы.

тик, коэффициенты асимметрии и эксцесса увеличивались в период 1980–1992 гг., а после 1992 г. наметилась тенденция к стабилизации и некоторому убыванию этих характеристик. При этом положительная асимметрия распределений (для нормального распределения  $g_3 = 0$ ) в течение всего периода сохранялась, а коэффициент эксцесса (для нормального распределения  $g_4 = 0$ ) имел в разное время как положительные, так и отрицательные значения. Интересно, что коэффициенты асимметрии и эксцесса, характеризующие 3-й и 4-й моменты распределения, проявляют, в основном, квазитрехлетнюю периодичность. На рис. 4 показаны также аппроксимации коэффициента эксцесса  $g_4$  и коэффициента вариации  $V$  полиномами 4-го порядка (тонкие линии). Видно, что долговременные изменения коэффициентов вариации и эксцесса происходили в противофазе, т.е. уменьшение коэффициента вариации сопровождалось увеличением коэффициента эксцесса, или, другими словами, трансформацией функции

распределения частот к более островершинному виду.

В целом можно отметить, что в течение периода 1992–1993 гг. произошли изменения в большинстве статистических характеристик временного ряда ОСО, полученного в результате измерений на ст. И.-К. Анализ спутниковых и наземных данных, проведенный в [1, 5], показал, что в этот период наблюдался глубокий минимум глобального общего содержания озона. Одна из возможных причин этих особенностей – извержение вулкана Пинатубо в июне 1991 г. Однако извержение вулкана Эль-Чичоне в 1982 г. не привело к существенным изменениям рассмотренных выше характеристик; оно не столь заметно повлияло на глобальный озоновый слой. Надо отметить, что оба извержения произошли в период развития процессов Эль-Ниньо [48] (мощного в 1982–1983 гг. и более слабого в 1991–1992 гг.) и примерно при одной фазе солнечной активности. Как показали результаты исследований [45–49],



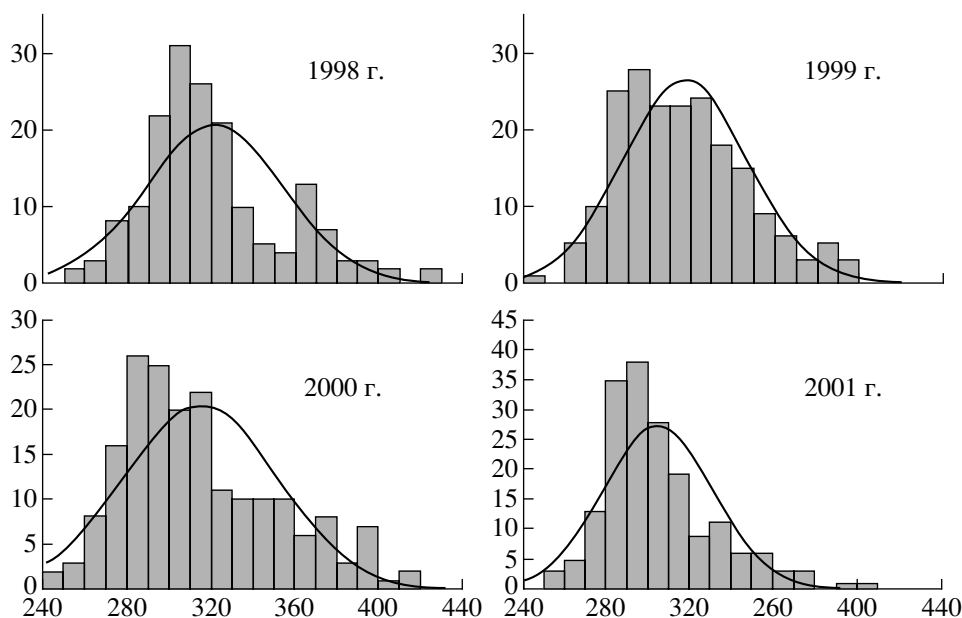
**Рис. 4.** Среднегодовые значения коэффициентов вариации ( $V$ ), асимметрии ( $g_3$ ) и эксцесса ( $g_4$ ) для каждого календарного года от 1980 до 2003 г. Тонкие линии 1 и 2 – аппроксимации полиномами 4-го порядка значений коэффициентов вариации и эксцесса соответственно.

после извержений вулканов Пинатубо и Эль-Чичоне произошло снижение концентрации озона, наиболее заметное в нижней стратосфере, причем влияние извержения Пинатубо на озоносферу по величине и по длительности эффекта превышало влияние извержения Эль-Чичоне. Согласно [49], ключевым фактором, определившим различия эффекта этих двух извержений на озоносферу, является увеличение к 1991 г., по сравнению с 1982 г., содержания в атмосфере хлорных соединений.

Одной из важных статистических характеристик является функция распределения частот, т.е. зависимость числа повторений значений изучаемой переменной в течение выбранного периода времени от величины этой переменной. Такие функции распределения для измерений, выполненных на ст. И.-К., были построены для каждого года, а типичные функции распределения показаны в виде гистограмм на рис. 5.

Каждый год распределения частот отличались от нормального в сторону положительной асимметрии, т.е. наиболее вероятное значение – мода смещена в область малых значений ОСО относительно медианы и относительно среднего (см. также табл. 1). В ряде случаев наблюдается бимодальное распределение (например, гистограмма для 1998 г.). Основная мода частот занимает интервал 290–310 е.Д. и в течение всего периода измерений (1980–2003 гг.) ее значения постепенно снижались. Второй пик на гистограмме распределений чаще всего располагался в интервале 350–370 е.Д.

В [65] было показано, что характеристики изменчивости поля ОСО и других атмосферных процессов могут зависеть от фазы экваториального стратосферного ветра (ЭСВ). Из рис. 3, где стрелками обозначены максимумы западной фазы стратосферного ветра для уровня 30 гПа [66], следует, что имеется тенденция к синхронизму между фазой ЭСВ и вариациями амплитуды и средних значений ОСО; бимодальные распределения ОСО наиболее часто наблюдаются в годы, характеризующиеся определенной фазой ЭСВ. Однако эти особенности вариаций ОСО базируются



**Рис. 5.** Гистограммы распределения частот повторяемости значений ОСО для 1998–2000 гг.. Сплошная линия – нормальное распределение. На оси абсцисс значения ОСО в е.Д., на оси ординат частота повторяемости значений ОСО.

ются на небольшом статистическом материале и нуждаются в дальнейшей проверке.

Искажения функции распределения, связанные с коэффициентом эксцесса внешне проявляются в симметричном уширении или сужении функции распределения. Непропорционально большое число наблюдений вблизи среднего значения приводит к узкому центральному максимуму. Для значений ОСО, полученных на И.-К., распределения с минимальной шириной наблюдались в 1994 и 2001 г. Однако интерпретация вариаций коэффициентов  $g_4$  (и  $g_3$ ) как коэффициентов нормального или почти нормального распределения, видимо, не совсем корректна, так как мы имеем временной ряд с заметной тенденцией к бимодальности распределения. Вероятнее всего, что вариации этих коэффициентов для анализируемого временного ряда в большей степени обусловлены квазипериодическим появлением второго максимума в распределении частот. Появление (даже слабой) второй моды в области повышенных значений ОСО приводит к тому, что основная мода становится более узкой (меняется коэффициент эксцесса), а ее максимум смещается относительно среднего значения в сторону меньших величин (асимметрия распределения становится положительной).

Рост ОСО, начавшийся после минимума, наблюдавшегося в период 1992–1994 гг., послужил основой ряда работ (см. например, [6–14]), в которых рассматриваются причины наметившегося роста концентрации стратосферного озона и обсуждаются проблемы выделения антропогенного сигнала из длиннопериодных вариаций ОСО. Наиболее распространенная методика выделения тренда антропогенной составляющей заключается в фильтрации различными способами так называемых “естественных” составляющих изменчивости ОСО. Наряду с сезонными вариациями к естественным составляющим наиболее часто относят изменчивость, вызванную влиянием квазидвухлетней цикличности стратосферного ветра, солнечной активности и явлением Эль-Ниньо–Южное Колебание (ЭНЮК) [1].

Широкое распространение также получили мультирегрессионные модели, в которых отклик ОСО на глобальные изменения динамики атмосферы параметризуется с помощью индексов Северо-Атлантического, Арктического и др. колебаний, а влияние локальных динамических процессов учитывается путем включения высоты тропопаузы, потенциальной завихренности, температуры на различных высотах в число регрессоров. В качестве регрессоров могут быть также использованы оптическая плотность стратосферного аэрозоля (для учета влияния вулканов), содержание хлорных соединений и т.д. [14, 28, 30, 33, 67–71], так что общее число “естественных” регрессоров может быть более десяти. Обычно

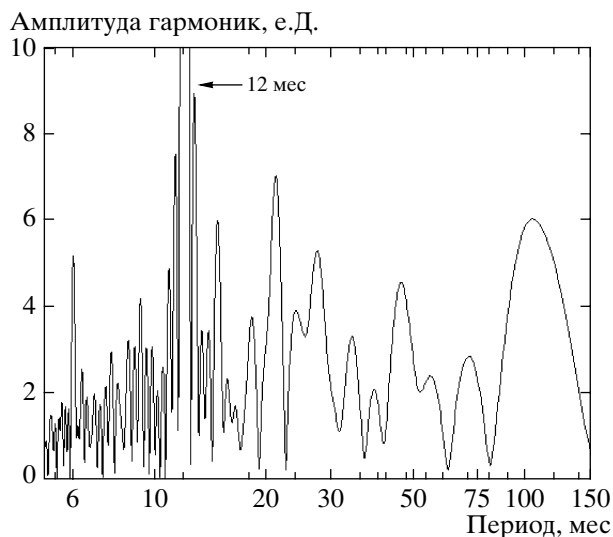
тренд включают в статистические модели как линейную или параболическую функцию [72]. Однако предложены и альтернативные методы описания длиннопериодных вариаций с помощью гладких кривых (метод накопления отклонений от прогнозируемого уровня и метод сглаженной для анализируемого периода кривой роста) [14, 69].

Однако физические механизмы, связывающие вариации ОСО с изменениями перечисленных выше и других возможных регрессоров, окончательно не определены. Известно, что величина трендов зависит от многих факторов: географических координат, сезона, вертикального распределения озона и т.д. Мультирегрессионные модели могут давать различные результаты в зависимости от выбранных методов подготовки данных и в зависимости от предположений о характере связи вариаций ОСО и регрессоров (показательны противоречивые выводы относительно оценок антропогенной составляющей трендов озона в [73]). Количественные оценки антропогенного сигнала в климатических моделях тоже весьма неопределенны [74]. Поэтому поиск корреляционных связей между вариациями поля озона и вариациями других гео- и гелиофизических процессов и создание обоснованных методик выявления антропогенного сигнала является важным направлением исследований. В данной статье мы ограничиваемся констатацией факта уменьшения общего содержания озона в атмосфере над ст. И.-К. в период с 1980 по 2003 гг. на 29 е.Д.

## РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Исследования характеристик и спектрального состава вариаций ОСО и вариаций многих других геофизических рядов связаны с определенными трудностями. В их числе нестабильность и изменчивость выявляемых гармоник, пропуски в измерениях и значительная дисперсия измеренных величин. Для нелинейной системы, каковой является атмосфера, характерные времена развития и затухания пульсаций различных параметров, характеризующих состояние атмосферы (в том числе и изменчивость газового состава) определяются нелинейными релаксационными процессами [75]. Это находит отражение в изменчивости с течением времени периодов, фаз и амплитуд гармоник, выявляемых в вариациях атмосферного озона.

Поэтому при исследовании поля атмосферного озона представляется логичным, наряду с Фурье-анализом, использовать вейвлетные спектральные методы анализа [76, 77], которые позволяют не только установить наличие квазипериодических колебаний, но и проследить динамику их развития и затухания. Другими словами, высокое разрешение Фурье-анализа может быть использовано для выявления основных колебаний, при-



**Рис. 6.** Спектрограмма среднемесячных значений ОСО для периода 1980–2003 гг. Амплитуда годовой гармоники равна 32.4 е.Д.

существующих в рядах результатов измерений, а вейвлет-преобразование – для определения эволюции этих колебаний во времени.

На основе численных экспериментов была разработана следующая процедура определения периодов, амплитуд и фаз колебаний ОСО. Из результатов измерений перед проведением Фурье- или вейвлет-преобразований исключали линейный тренд. Для анализа среднемесячных данных, которые не имели пропусков, применяли алгоритм классического Фурье-анализа (СФТ), позволяющий определить амплитуды и периоды колебаний с существенно меньшей погрешностью, чем алгоритм быстрого Фурье-преобразования (FFT). При анализе среднедневных данных были сопоставлены результаты двух методов: модифицированного классического Фурье-преобразования (SCFT), разработанного для анализа рядов с неравномерно расположенными во времени пропусками [78], и классического СФТ, который был применен после заполнения пропусков методом кубической интерполяции. Вейвлетное преобразование (с использованием вещественной функции Морле) применялось с целью получения оценок изменчивости во времени параметров колебаний, которые были получены с помощью Фурье-анализа.

Значимость параметров колебаний (периодов, амплитуд и фаз) была определена методом, аналогичным [79, 80]. Ряд вариаций ОСО представлялся в виде суммы тренда и гармонических колебаний, а параметры этой модели находились методом наименьших квадратов. При этом в качестве первого приближения в методе наименьших квадратов использовали значения периодов и амплитуд колебаний, полученные предварительно с помощью Фу-

рье-анализа и вейвлетного анализа. Приведенные ниже параметры, характеризующие периоды и амплитуды колебаний ОСО, имеют уровень значимости от 1 до 3 сигма.

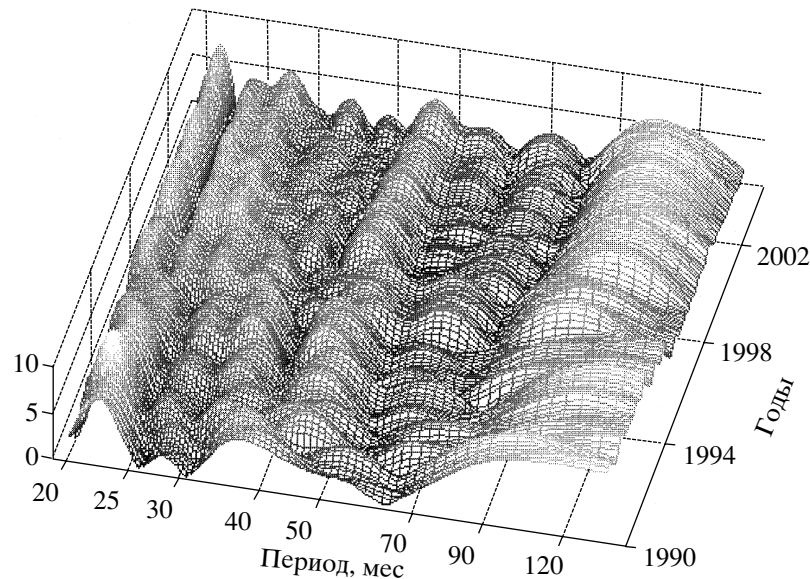
**Длиннопериодные колебания.** Спектральный анализ результатов измерений ОСО (среднемесячные значения) проводили при помощи СФТ и вейвлет-преобразования. Результаты спектрального анализа вариаций ОСО за период 1980–2003 гг. методом СФТ приведены на рис. 6. Видно, что наибольшую амплитуду имеет колебание с периодом 12 мес. Значимыми являются также колебания с периодами 6 мес. (полугодие), а также с периодами около 15, 18, 21, 27, 46 и 104 мес.

Результаты спектрального анализа зависят от продолжительности анализируемого временного ряда. Чтобы выяснить, в течение какого интервала времени сформировался представленный на рис. 6 спектр колебаний ОСО и каков характер трансформации этого спектра при изменении длительности ряда измерений, мы использовали следующую процедуру. Вначале мы провели спектральный СФТ-анализ измерений, продолжавшихся 120 месяцев ( $N = 120$ ), т.е. для периода времени с 1980 по 1989 гг. Затем значения  $N$  постепенно увеличивали на один месяц, вплоть до  $N = 288$ , т.е. удлиннили период до 2003 г. включительно и для каждого нового ряда выполнили спектральный анализ.

Трансформация спектральной структуры ряда ОСО для колебаний с периодами от 20 до 130 мес показана на рис. 7, а в табл. 2 приведены периоды основных наблюдаемых колебаний в интервале от 3 до 120 мес для 4-х отрезков времени длиной 10, 15, 20 и 24 года. Анализ показал, что для всех интервалов времени стабильно проявляются только колебания с периодами 6 и 12 мес, а периоды остальных колебаний изменяются при увеличении длины анализируемого ряда.

Как следует из рис. 7 и табл. 2, гармоники, выявленные при анализе полного ряда (рис. 6), проявляются, когда ряд измерений пролонгирован на 15 и более лет. Рассмотрим поведение некоторых гармоник, соответствующих Фурье-анализу полного ряда (4-я строка табл. 2). Амплитуда гармоники с периодом около 21 мес, начиная с 1994 г., была примерно в два раза больше амплитуды гармоники с периодом около 24 мес. Гармоника с периодом около 27 мес заметна на протяжении всего периода измерений. Достаточно стабильным было и колебание с периодом около 46 мес. Интересно отметить, что во время мощного Эль-Ниньо 1997–1998 гг. период последней гармоники немного сместился в область более низких частот. Наиболее длиннопериодные гармоники в первые годы измерений ОСО имели максимальную спектральную плотность в широком интервале от 90 до 130 мес. Видимо, этот результат свя-





**Рис. 7.** Изменение спектрального состава ОСО при постепенном увеличении длины ряда на 1 месяц от 01.1980–01.1990 гг. до 01.1980–12.2003 гг. Вертикальная шкала – амплитуда колебаний в е.Д.

зан с недостаточной длиной анализируемого ряда. По мере удлинения ряда наблюдений происходит локализация периода наиболее длиннопериодных колебаний в диапазоне 102–110 мес. Можно также отметить, что амплитуда вариаций, имеющих периоды от 4.5 до 7 лет, мала.

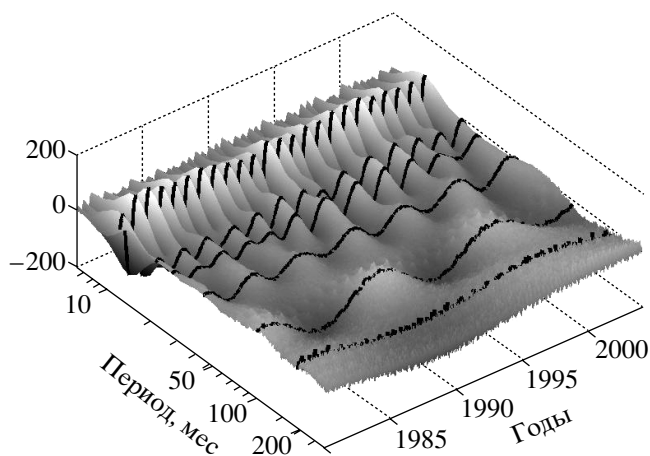
Результаты вейвлетного анализа вариаций ОСО для колебаний с периодами от 6 до 200 мес показаны на рис. 8. Прежде чем рассмотреть характерные особенности изменчивости длиннопериодных вариаций ОСО, необходимо определить некоторые термины. Дело в том, что исследование спектральной структуры различных гео- и гелиофизических временных рядов, проводившиеся в последние 10–30 лет, привели к некоторой неопределенности в терминологической идентификации спектральных составляющих, наблюдаемых в этих рядах. Устоявшаяся терминология относится к годовым и полугодовым колебаниям: АО (*Annual Oscillation*) – годовое колебание, SAO (*Semiannual Oscillation*) – полугодовое колебание. В начале 60-х годов Анжелом [81] для колебаний с периодами около 2-х лет был введен термин QBO (*Quasi-biennial Oscillation*). В настоящее время в литературе можно встретиться также с такими

терминами как BO (*Biennial Oscillation*) – двухлетнее колебание, QTO (*Quasitriennial Oscillation*) – квазитрехлетнее колебание, QQQ (*Quasiquadrennial Oscillation*) – квазичетырехлетнее колебание, TQO (*Triennial-Quadrennial Oscillation*) – трех-четырёх летнее колебание, FYO (*Five Year Oscillation*) – пятилетнее колебание, SSO (*Six-Seven Year Oscillations*) – колебания с периодами 6–7 лет, QDO и DO (*Quasidecadal, Decadal Oscillation*) – квазидесятилетнее и десятилетнее колебания, ENSO (*El-Ninio-South-Oscillation*) – ЭНЮК (Эль-Ниньо–Южное Колебание), SSC (*Sunspot Cycle*) – колебания с периодами около 11 лет, связанные с солнечной активностью, LNP – (*Lunar Nutation Period*) – колебания, близкие к периоду нутации Луны или периоду вынужденной нутации Земли (18.6 лет), и колебания с периодом Хейла около 22 лет, связанные со сменой знака межпланетного магнитного поля [1, 15, 19–21, 81–93].

Механизмы, ответственные за перечисленные квазипериодические колебания в параметрах геофизических процессов и, в частности, в вариациях поля ОСО, недостаточно изучены, а диапазон периодов колебаний, для которых применяется каждый из указанных терминов, достаточно ши-

**Таблица 2.** Периоды колебаний ряда ОСО

Временной интервал	Период колебаний, мес												
	6.0	12.0	14.1	18.2	22.0	–	27.9	–	37.3	–	–	–	115
1980–1989	6.0	12.0	14.6	18.5	21.0	24.0	30.0	33.4	–	43	59	–	97
1980–1994	6.0	12.0	14.7	18.0	21.3	24.3	27.0	35.5	–	44	–	–	102
1980–2003	6.0	12.0	14.7	18.2	21.1	23.8	27.4	34.1	39.1	46	55	70	104



**Рис. 8.** Вейвлетограмма общего содержания озона. Периоды от 6 до 200 мес. Амплитуда колебаний дана в относительных единицах. Для ясности сплошными толстыми линиями показаны сечения вейвлетограммы для колебаний с периодами 12, 21, 27, 44, 102 и 190 мес.

рок и различен у разных авторов. Поэтому в данной статье мы будем использовать только некоторые из перечисленных терминов в следующем контексте:

QBO – квазидвухлетнее колебание, с периодом от 20 до 34 мес;

TQO – трех-четырёхлетнее колебание (между QBO и QFO) с периодом от 34 до 50 мес;

QFO – квазипятилетнее колебание, с периодом от 50 до 70 мес;

QDO – квазидесятилетнее колебание с периодом от 90 до 140 мес.

Кроме того, хотя результаты каждого отдельного Фурье-анализа дают определенные параметры гармонических колебаний, надо учитывать, что с течением времени параметры некоторых гармоник могут меняться, т.е. реальные колебания могут быть квазипериодическими.

**Колебания с периодами более 90 мес.** Вейвлетный и Фурье-анализ (рис. 6–8) показали, что наиболее длиннопериодные колебания ОСО имеют периоды 100–105 мес и 180–220 мес. Возможность уверенной идентификации последнего колебания находится на границе возможностей методов вейвлетного анализа и Фурье – анализа, поскольку в период измерений укладывается лишь немногим больше одного периода волны. Видимо, только дальнейшие наблюдения и пролонгация однородных непрерывных последовательностей измерений позволят ответить на вопрос о реальности такого колебания. Тем не менее имеются некоторые доводы в пользу существования колебания с близким периодом. При анализе длинных рядов измерений ОСО, выполненных на станции Ароза [19, 80], были отмечены колебания с периодами от 16 до 22 лет. В [94] было показано, что одной

из причин наличия спектральных спутников (*side-lobes*) вблизи годовой гармоники ОСО могут служить биения годовой гармоники с колебанием, имеющим период около 19 лет. В вариациях солнечной инсоляции девятнадцатилетний период был выделен в качестве одного из основных колебаний, и было сделано предположение о связи этого колебания с периодом обращения узла лунной орбиты, который равен 18.6 лет [84].

Вейвлетный анализ результатов измерений ОСО на ст. И.-К. показал (рис. 8), что колебания, близкие по периодичности к QDO, имеющие почти синусоидальный характер и период 8.5–9 лет, принадлежат к числу наиболее стабильных колебаний. Колебания с близкими периодами были обнаружены не только в вариациях ОСО, но и в вариациях других геофизических параметров. Вопрос о существовании таких колебаний, в том числе и в вариациях ОСО, рассматривался чаще всего в связи с возможным влиянием цикличности солнечной активности [18, 20, 27, 28, 46, 54, 80, 95]. Однако в этом вопросе остается много неясного. Например, более четко “солнечный сигнал” (при регрессии на индекс солнечных пятен Вольфа или радиоизлучения Солнца на частоте 10.7 см) проявляется при предварительной обработке анализируемых рядов и выделении из этих рядов сезонов и/или лет с определенной фазой колебаний стратосферного ветра [20, 21]. Установлено, что глобальное распределение амплитуды QDO характеризуется существенной широтной и долготной пространственной неоднородностью [68, 70, 96], а анализ наиболее длинных рядов измерений ОСО указывает на периодическое смещение по фазе между максимумами индекса солнечной активности и максимумами озонной квазидесятилетней гармоники (например [19]).

**Колебания с периодами 18–90 мес.** Амплитуды колебаний, имеющие периоды 50–90 мес, невелики и нечетко выражены. Поэтому более подробно остановимся на колебаниях с периодами, близкими к периодам QBO и TQO. Соответствующая вейвлетограмма представлена на рис. 9. Колебание TQO с периодами 44–50 мес близко по виду к синусоиде, однако в период наблюдений амплитуда этого колебания почти линейно увеличивалась. Максимальные амплитуды QBO до 1990 г. локализовались в двух диапазонах периодов: 20–24 мес и 33–35 мес. В 1991–1992 гг. максимальные амплитуды этого колебания имели периодичность около 28–32 мес. После 1993 г. период колебаний, имеющих наибольшую амплитуду, каждый год уменьшался на 1–1.5 мес, вплоть до 2002 г., пока не достиг значений в интервале 21–23 мес.

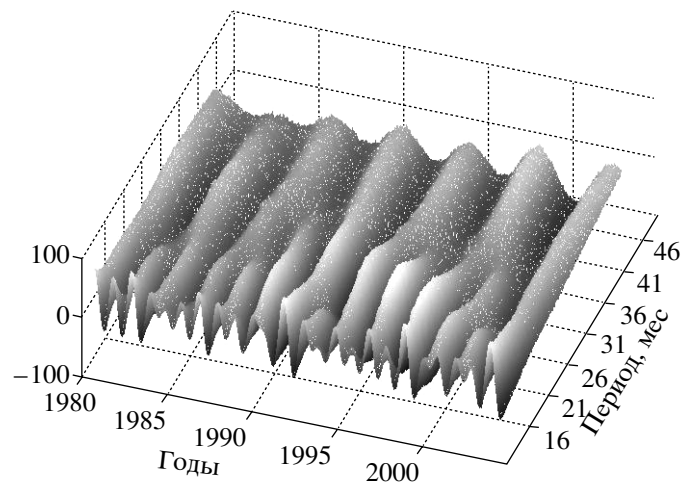
В среднем за 1980–2003 гг. колебания с периодами вблизи 20–22 и 27–29 мес имели сравнительно стабильную амплитуду. Именно поэтому они и были выделены Фурье-анализом. Почти анало-

гичное поведение характерно для квазидвухлетних колебаний температуры над ст. И.-К. на высоте вблизи уровня 100 мб [59]. Хотя квазидвухлетняя изменчивость прослеживается не только для экваториального стратосферного ветра, ОСО и температуры, но и для ряда других характеристик атмосферы, до настоящего времени не существует общепринятой трактовки причин происхождения этой периодичности (например [15, 25, 50, 66, 73, 90, 93, 97–101]).

В [97] было выдвинуто предположение, что возможной причиной возникновения таких периодичностей является суперпозиция колебаний. Если имеются основные колебания с периодами 25 и 28.8 мес, тогда их разность должна дать колебание с периодом 190 мес, а сумма должна дать колебание с периодом 13.4 мес. И наоборот, если основные колебания имеют периоды вблизи 190 мес (LNP) и вблизи 26 мес (удвоенный период нутации полюсов), то возможны суперпозиционные колебания с квазидвухлетними периодами около 22 и около 30 мес. Различные варианты подобной интерпретации были предложены также в [15, 82, 83, 90, 101]. Можно также исходить из предположения [102], согласно которому квазидвухлетние колебания являются обертонами какого-то основного колебания. Например, если предположить, что основное колебание – это LNP (18.6 лет или 223.2 мес), то могут наблюдаться его обертоны вблизи 112, 74, 56, 45, 37, 32, 28, 24.8, 22.3 мес и т.д. Недостаток подобных интерпретаций заключается в недостаточном обосновании физических механизмов, создающих условия для резонансного усиления того или иного обертона или комбинационной частоты.

Результаты спектрального анализа глобального поля ОСО (данные TOMS, версия 7) проведенные для каждого узла сетки с шагом  $1.25^\circ$  по долготе и  $1^\circ$  по широте показали, что в любой части земного шара всегда существует несколько гармоник с периодами от 21 до 33 мес, причем максимальные амплитуды гармоник чаще наблюдаются в 3-х интервалах периодов: 24–26, 27–29 и 32–34 мес [100]. Пространственные распределения амплитуд этих гармоник существенно различаются везде, кроме области вблизи экватора. Одна из причин такого поведения квазидвухлетних колебания поля ОСО, возможно, заключается в мультиплетной структуре этих колебаний и в существовании в различных частях земного шара условий, способствующих преимущественному развитию одной из компонент мультиплета.

**Колебания с периодами от 6 до 18 мес.** Колебания ОСО с периодом 12 мес являются доминирующими. Амплитуда этих колебаний с течением времени немного меняется (максимальные и минимальные значения наблюдались в течение 1981–1982 и 1998–1999 гг. в течение 1990–1992 гг.

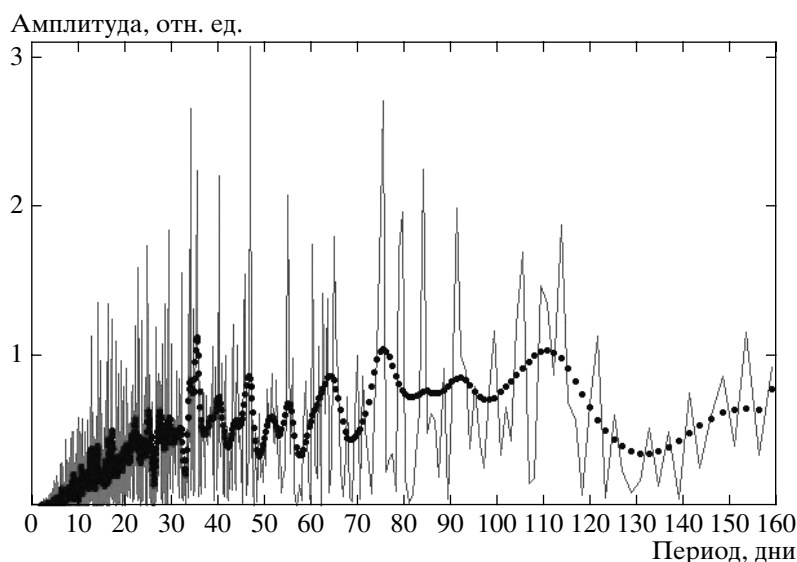


**Рис. 9.** Вейвлетограмма общего содержания озона. Периоды от 16 до 46 мес. Амплитуда колебаний дана в относительных единицах.

соответственно). Возможно, это указывает на модуляцию колебанием, имеющим период около 16–17 лет. Колебания с периодами 6, 14.8 и 18 мес имеют достаточно сложную пульсирующую структуру. Следует отметить, что, хотя колебание с периодом 6 мес характеризуется стабильным периодом и фазой, временная изменчивость амплитуды этого колебания достаточно сложна. Для колебаний с периодами 14.8 и 18 мес заметна модуляция амплитуды колебаний с периодичностью 2–3 года и 4–6 лет.

## МОДЕЛЬ МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ОСО

На основе измерений ОСО, выполненных в течение девятнадцати лет (1980–1998 гг.) в [57] была предложена простая модель их временных вариаций, включающая линейный тренд и сумму гармонических составляющих с периодами 6, 12, 21, 27, 44 и 102 мес. Эта модель с уточненными параметрами линейного тренда успешно (со средней квадратичной погрешностью  $\pm 3.3\%$ ) описывает временной ход среднемесячных величин ОСО, измеряемых на ст. И.-К. Рассмотренные выше результаты Фурье-анализа и вейвлетного анализа свидетельствует о том, что такая аппроксимация оказалась успешной главным образом благодаря правильному выбору основных колебаний ОСО, а также благодаря относительной стабильности линейного отрицательного тренда в течение периода измерений. Уточнение параметров модели с учетом данных, полученных в настоящей работе, и, в частности, увеличение числа гармоник (табл. 2), позволяет лишь незначительно снизить погрешность аппроксимации.



**Рис. 10.** Спектрограмма короткопериодных вариаций ОСО. Точки – результат сглаживания спектра с помощью окна Хамминга. Амплитуды колебаний указаны в относительных единицах.

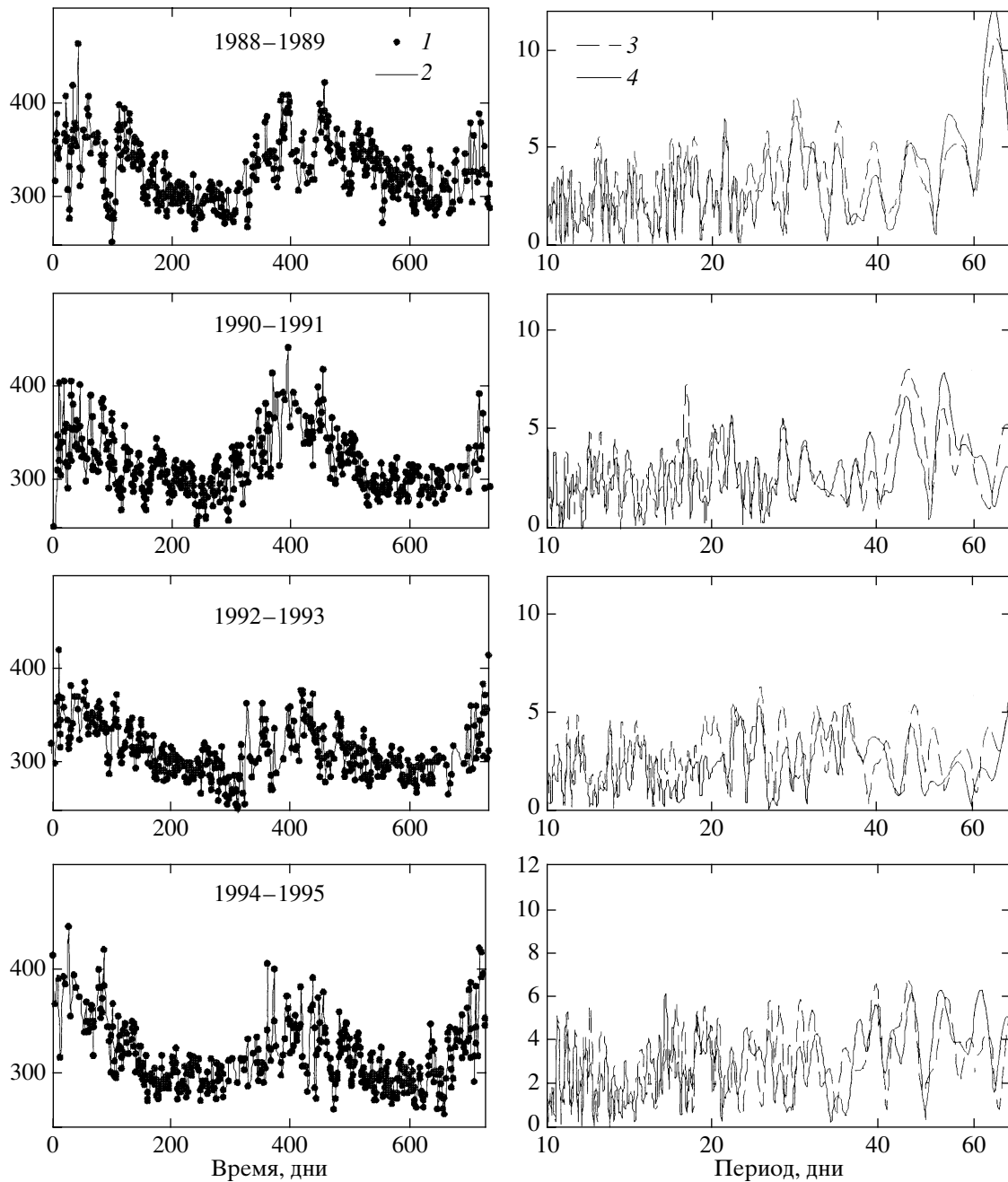
**6.2. Короткопериодные колебания.** Спектр короткопериодных колебаний ОСО, т.е. результаты Фурье-анализа средневременных значений ОСО за весь период измерений показан на рис. 10. Точки на рисунке получены сглаживанием с помощью окна Хамминга шириной 14 отсчетов. Чтобы выявить изменчивость амплитуд и периодов короткопериодных колебаний во времени, мы провели спектральный анализ двухлетних участков последовательности измеренных значений.

В качестве примера на рис. 11 показаны результаты измерений и соответствующие периододограммы для двухлетних участков, покрывающих период с 1988 по 1995 г. Периододограммы средневременных значений ОСО имеют сложную структуру, особенно для гармоник с периодичностью менее 20 дней. Причины такого поведения могут быть связаны как с реальными процессами, приводящими к соответствующим вариациям поля ОСО, так и с погрешностями, обусловленными ошибками измерений, перерывами в измерениях и погрешностями Фурье-анализа. Поэтому спектры, представленные на рис. 11, рассчитывали как для исходного ряда, содержащего перерывы в измерениях (точки 1 на рис. 11), так и для ряда, в котором пропуски заполнены методом кубической интерполяции (кривая 2 на рис. 11). Фурье-анализ проводили методом SCFT [78], (линии 3 и 4 соответственно).

Сопоставление спектров показывает, что в подавляющем большинстве случаев периоды наблюдаемых колебаний совпадают. Однако амплитуды колебаний в некоторых случаях различаются. Из рисунка видно, что в разные двухгодичные ин-

тервалы спектральный состав колебаний существенно отличается. В целом для всего периода измерений наиболее часто проявляются колебания с периодами вблизи 27–29 и 34–36 дней (см. также рис. 10), хотя время от времени на периододограммах проявляются интенсивные колебания с периодами 13–14, 21–24, 40–60 и 85–120 дней. Аналогичным образом были исследованы средневременные значения спутниковых измерений [62]. Сопоставление спектров, полученных по результатам наземных и спутниковых измерений, показало, что вариации во времени частот и даже вариации амплитуд достаточно хорошо согласуются, хотя для некоторых двухлетних интервалов могут наблюдаться различия. Более того, оказалось, что даже в высокочастотной области спектра (от 10 до 25 дней) спектральные компоненты обнаруживаются, как правило, на одних и тех же частотах.

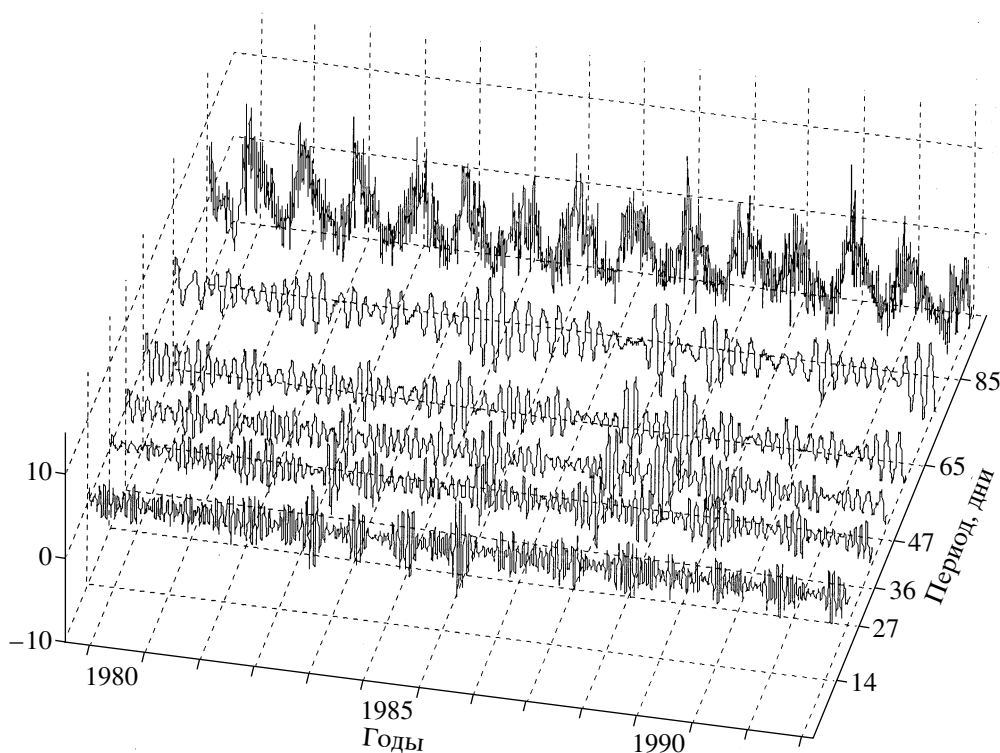
Так как короткопериодные колебания проявляются в форме пульсаций, выделение какой-либо основной короткопериодной компоненты затруднено. Пульсирующий характер короткопериодных колебаний отчетливо виден на рис. 12, на котором частично представлены результаты вейвлетного анализа результатов измерений, полученных в 1980–1992 гг. На этом рисунке показаны сечения вейвлетограммы для колебаний с периодами 14, 27, 36, 47, 65 и 85 дней. Эти колебания, имея пульсирующий характер, проявлялись в период 1980–1992 гг. сравнительно стабильно, что и обусловило их выделение Фурье-анализом. Анализ вейвлетограмм за весь период измерений показал, что, как и следовало ожидать, периоды основных короткопериодных колебаний, найденные с помощью Фурье-анализа, как правило, соответству-



**Рис. 11.** Вариации средневенных значений ОСО за 1988–1995 гг. и их спектры. Данные измерений показаны в левой части рисунка точками (1), аппроксимация кубическим сплайном – сплошной линией (2). В правой части рисунка показаны спектрограммы для ряда измеренных значений ОСО и того же ряда, в котором пропуски в измерениях заполнены методом кубической интерполяции, линии 3 и 4 соответственно. Амплитуды вариаций ОСО и спектральные амплитуды колебаний даны в е.Д.

ют колебаниям с максимальными амплитудами на вейвлетограммах. Однако вейвлетный анализ показал также, что изменчивость во времени амплитуд этих колебаний имеет сложный характер и не существует спектральной области, в которой амплитуда какой-либо короткопериодной гармоник сохранялась бы стабильной в течение длительного времени.

Аналогичным образом был проведен вейвлетный анализ спутниковых данных (TOMS). Сопоставление вейвлетограмм, полученных для результатов наземных и спутниковых измерений, показало, что при некотором отличии в амплитуде спектральных составляющих, их временное поведение – пульсирующий, ритмический характер, а также периоды времени с повышенной и пони-



**Рис. 12.** Сечения вейвлетограммы для периодов 14, 27, 36, 47, 65 и 85 дней. На заднем плане показан ряд ОСО. Амплитуды колебаний даны в относительных единицах.

женной амплитудой колебаний совпадают. Приборы, методы измерений и методы обработки результатов, используемые для наземных и для спутниковых измерений, различны. Поэтому есть основания считать, что выявленная сложная структура спектра короткопериодных колебаний ОСО отражает влияние реальных природных процессов на вариации общего содержания озона.

На основании результатов Фурье-анализа и вейвлетного анализа мы можем выделить некоторые наиболее характерные особенности короткопериодных вариаций значений ОСО.

**Колебания с периодами 25–60 дней.** В этот диапазон попадают периоды колебаний, которые часто называют колебаниями “MJ” – Маддена–Юлиуса (40–50 дней) [103], а также периоды обращения солнечных пятен [104, 105] и период повторения фаз Луны [106].

Для средней части этого интервала, т.е. колебаний с периодами 25–40 дней, для большинства годовых интервалов наблюдений отмечается амплитудная и частотная модуляция этих колебаний полугодовым ритмом. Максимальные амплитуды пульсаций в начале года обычно приходятся на колебания с периодами 27 и менее дней. К марту–апрелю периоды колебаний с максимальными амплитудами постепенно смещаются в область с

периодами 30–40 дней, а к середине года максимальные амплитуды колебаний снова наблюдаются для колебаний с периодами около 27 дней. Следующий максимум колебаний с периодами 30–40 дней наблюдается в сентябре–октябре. Однако не каждый год эта тенденция проявляется достаточно четко.

Колебания с периодами продолжительностью 50–60 дней являются переходными в том смысле, что в этой спектральной области происходит разделение (удвоение, утроение) частот колебаний. Интенсивные колебания с такими периодами за некоторыми исключениями почти не встречаются.

**Колебания с периодами более 60 дней.** Пульсации гармоник с периодами от 60–100 дней наиболее ярко проявились в 1984–1989 гг. и после 1999 г., но были слабо выражены в 1990–1993 и 1994–1996 гг. Развитие таких пульсаций нельзя отнести к определенному сезону календарного года: в январе–феврале может наблюдаться как максимум, так и минимум амплитуд этих колебаний. Колебания с такими периодами с течением времени иногда плавно смещаются в область более короткопериодных гармоник (например, в 1980–1982 гг. максимальные амплитуды постепенно плавно смещались от колебаний с периодами 110 дней до колебаний с периодами 40 дней).

Колебания с периодами более 100–110 дней, как правило, возникают с периодичностью, близкой к 6 мес. Максимумы пульсаций наиболее интенсивны в январе-начале февраля и менее интенсивны в июне-июле.

**Колебания с периодами менее 25 дней.** Пульсации с периодами 10–25 дней очень нестабильны. Анализ показал, что в этом интервале несколько более заметны колебания с периодами 13–14 дней.

Значимость параметров короткопериодных гармоник, имеющих пульсирующий характер, мы не оценивали, так как соответствующие алгоритмы разработаны недостаточно, а результаты оценок зависят от используемого подхода.

В целом максимальные амплитуды короткопериодных пульсаций более вероятны в сезон, когда максимальны вариации ОСО (декабрь-январь). Ранее в [16] было отмечено, что зимой амплитуды колебаний с периодами около 27 дней увеличиваются, причем фазы и амплитуды этих колебаний зависят от географических координат. Имеется достаточное число публикаций, результаты которых говорят о том, что природа колебаний ОСО с периодами около 27 дней обусловлена солнечной активностью, однако этот вывод остается дискуссионным, по крайней мере, применительно к нижней стратосфере. В работе [107, 108] был сделан вывод, что индуцированные солнцем колебания с периодами около 27 дней могут быть обнаружены только при благоприятных обстоятельствах и что короткопериодные возмущения озонового слоя вызваны динамическими процессами, приводящими к тому, что стратосфера постоянно находится в колебательном режиме. В работах [109, 110] было отмечено, что циклическим изменениям с периодами около 14, 27 и 34–40 дней подвержен и ряд других характеристик атмосферы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе измерений, выполненных на станции Иссик-Куль (Центральная Азия) в 1980–2003 гг., исследована изменчивость во времени статистических и спектральных характеристик вариаций общего содержания атмосферного озона.

Общее содержание озона в течение периода измерений уменьшалось, причем можно отметить три интервала времени, в течение которых снижение ОСО было особенно заметно: 1980–1985, 1989–1993 и 1998–2002 гг. Линейный отрицательный тренд равен  $1.29 \pm 0.08$  е.Д. в год ( $-0.38$  %/год). Диапазон сезонных вариаций ОСО (от минимума до максимума) колебался от 130 до 230 е.Д. Минимальные значения ОСО наблюдались, как правило, в осенний период, хотя кратковременные снижения ОСО до значений, близких к минимальным, были отмечены и зимой.

Результаты анализа изменчивости во времени статистических характеристик (гистограмм распределения ОСО, коэффициентов вариации, эксцесса, асимметрии, моды и медианы) показали, что выделяется интервал времени 1992–1993 гг. В этот период почти синхронно изменилось поведение максимальной амплитуды вариаций ОСО, среднегодовой составляющей и медианы. Коэффициент вариации, характеризующий изменчивость ряда данных ОСО, имел отрицательный тренд до 1993 г. и положительный тренд после 1993 г. С 1980 по 1992 г. происходил рост коэффициентов асимметрии и эксцесса распределений, а с 1993 г. стала заметной тенденция к снижению значений этих параметров. Возможной причиной изменения многих статистических характеристик ОСО в период 1992–1993 гг. могло быть мощное извержение вулкана Пинатубо в июне 1991 г. Однако мощное извержение вулкана Эль-Чичоне, которое произошло в апреле 1982 г., не повлияло на эти статистические характеристики ОСО.

Анализ гистограмм распределения частот показал отличие распределений от нормального и позволил установить, что наиболее вероятное значение – мода смещена в область малых значений ОСО и не совпадает ни с медианой, ни со средним значением. В ряде случаев наблюдается бимодальность распределения. Основная мода частот ОСО на станции И.-К. находится в интервале 290–310 е.Д. и уменьшается по величине в течение всего периода измерений. Второй пик на гистограмме распределений чаще всего располагается в интервале 350–370 е.Д. Бимодальность распределения приводит к тому, что основная мода, смещается относительно среднего значения, становится более узкой, что приводит к росту коэффициентов асимметрии и эксцесса.

Фурье-анализ вариаций ОСО показал, что во всем двадцатичетырехлетнем массиве данных могут быть выделены длиннопериодные колебания с периодами около 6, 15, 18, 21, 24, 27, 34, 46, 70 и 104 мес. Результаты вейвлетного анализа позволили выявить, что в течение всего периода измерений только годовая гармоника (12 мес) и колебания в интервале 100–110 мес характеризовались сравнительно стабильными амплитудами и периодами. Квазидвухлетние колебания до 1990–1991 гг. имели сравнительно регулярную структуру с максимальными амплитудами в области 20–24 мес и 33–35 мес. В течение 1991–1993 гг. максимальные амплитуды колебаний смещаются в область периодов от 28 до 32 мес и в последующие 7–8 лет происходит процесс медленной релаксации к положению, существовавшему до 1992 г. При этом амплитуда колебаний с периодами 20–22 и 27–29 мес в течение 1980–2003 гг. была в среднем относительно высокой. Амплитуда колебаний с периодами в диапазоне 44–50 мес в течение 24-х лет почти линейно росла. Полугодовая

гармоника имеет стабильные период и фазу, но амплитуда этой гармоника сложным образом зависит от времени.

Длиннопериодные вариации ОСО, выявленные в результате измерений ст. И.-К., описываются со среднеквадратичной погрешностью 3.3% моделью, включающей линейный тренд и сумму гармонических составляющих с периодами 6, 12, 21, 17, 44 и 102 мес.

Фурье-анализ и вейвлетный анализ среднедневных значений ОСО показал, что колебания с периодами от нескольких дней до нескольких месяцев имеют характер периодически возникающих и затухающих пульсаций. Среди таких короткопериодных колебаний гармоника со стабильными периодами, амплитудами и фазами отсутствуют. Наиболее часто проявляются колебания с периодами вблизи 27–29, 34–37 дней. Кроме того, повышенные амплитуды колебаний периодически наблюдаются для колебаний с периодами 13–14, 21–24, 40–60 дней. В целом для колебаний с периодами 25–40 дней для большинства годовых интервалов наблюдений наблюдается амплитудная и частотная модуляция этих колебаний полугодовым ритмом. Максимальные амплитуды пульсаций в начале года обычно приходятся на колебания с периодами 27 и менее дней. К марту-апрелю периоды колебаний с максимальными амплитудами постепенно смещаются в область с периодами 30–40 дней, а к середине года максимальные амплитуды колебаний снова наблюдаются для колебаний с периодами около 27 дней. Следующий максимум колебаний с периодами 30–40 дней наблюдается в сентябре-октябре.

Структуры короткопериодных и длинопериодных вариаций общестатистических и спектральных характеристик, выявленных в результате анализа данных, полученных наземной станцией И.-К. и спутниковым прибором ТОМС, хорошо согласуются. Поскольку приборы, методики измерений и процедуры обработки результатов, использовавшиеся для наземных и спутниковых измерений различны, то этот результат дает основания для предположения, что выявленные в данной работе особенности спектрально-временной структуры вариаций ОСО отражают реальные закономерности вариаций озонового слоя.

Авторы выражают признательность проф. В.Н. Арефьеву за поддержку и внимание к работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 04–05–64702) и ISTC (грант Кг–763).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002 // WMO. Report № 47. Geneva, Switzerland, 2003.

2. Александров Э.Л., Израэль Ю.А., Кароль И.Л., Хргиан А.Х. Озонный щит Земли и его изменения // СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 288 с.
3. Кондратьев К.Я. Глобальная динамика озона // Итоги науки и техники. ВИНТИ. Сер. Геомагнетизм и высокие слои атмосферы. 1989. Т. II. 210 с.
4. Vojtkov R.D., Balis D.S. Characteristics of episodes with extremely low ozone values in the northern middle latitudes 1957–2000 // Ann. Geophys. 2001. V. 19. P. 797–807.
5. Fioletov V.E., Bodeker G.E., Miller A.J. et al. Global and zonal total ozone variations estimated from ground based and satellite measurements: 1964–2000 // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. № D22. 4647. doi:10.1029/2001JD001350.
6. Зуев В.В., Бондаренко С.Л. К вопросу о долговременной изменчивости озоносферы: взгляд в прошлое и будущее // Оптика атмосферы и океана. 2002. Т. 15. № 10. С. 909–911.
7. Егорова Т.А., Розанов Е.В., Кароль И.Л. и др. Моделирование межгодовых изменений общего содержания озона в 1993–2000 гг. и влияние ограничений производства озоноразрушающих веществ // Метеорология и гидрология. 2002. № 1. С. 5–13.
8. Austin J., Butchart N. Coupled chemistry-climate model simulations for the period 1980 to 2020: Ozone depletion and the start of ozone recovery // Quart. J. Roy. Met. Soc. 2003. V. 129. № B595. P. 3325–3341.
9. Manzini E., Steil B., Bruhl C. et al. A new interactive chemistry-climate model. II. Sensitivity of the middle atmosphere to ozone depletion and increase in greenhouse gases: implication for recent stratospheric cooling // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № D14. 4429. doi:10.1029/2002JD002977.
10. Newchurch M.J., Yang E.-S., Cunnold D.M. et al. III. Evidence for Slowdown in Stratospheric Ozone Loss: First Stage of Ozone Recovery. // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № D16. 4507. doi:10.1029/2003JD003471.
11. Salby M., Callaghan P. Interannual changes of the stratospheric circulation: relationship to ozone and tropospheric structure // J. Climate. 2002. V. 15. № 24. P. 3673–3685.
12. Shindell D.T., Rind D., Loneragan P. Increases in polar stratospheric ozone losses and delayed recovery owing to increasing greenhouse gas concentrations // Nature. 1998. V. 392. P. 589–592.
13. Strahan S.E., Douglass A.R. Evaluating the credibility of transport processes in the Global Modeling Initiative simulations of ozone recovery // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. № D05110. doi:10.1029/2003JD004238.
14. Reinsel G.C. Trend analysis of upper stratospheric Umkehr ozone data for evidence of turnaround // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29. № 10. doi:10.1029/2002GL014716.
15. Груздев А.Н., Мохов И.И. Квазидвухлетняя цикличность в глобальном поле общего содержания озона по данным наземных наблюдений // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1992. Т. 28. № 5. С. 475–485.
16. Бекорюков В.И. Некоторые периодичности общего содержания и плотности озона // Метеорология и гидрология. 1985. № 2. С.106–111.



17. Черников А.А., Борисов Ю.А., Зуев В.В. и др. Тенденции изменений озонового слоя по наблюдениям с помощью спутниковой аппаратуры TOMS и наземной озонметрической сети // Исследования Земли из космоса. 2000. № 6. С. 23–32.
18. Hood L.L. The solar cycle variation of total ozone: Dynamical forcing in the lower stratosphere // J. Geoph. Res. 1997. V. 102. № D1. P. 1355–1370.
19. Kane R.P. Long term variation of total ozone // Pure Appl. Geoph. 1988. V. 127. № 1. P. 143–154.
20. Labitzke K., Van Loon H. The spatial distribution of the association between total ozone and the 11-year solar cycle // Geoph. Res. Lett. 1992. V. 19. №4. P. 401–403.
21. Labitzke K. The global signal of the 11-year sunspot cycle in the atmosphere: when do we need the QBO? // Meteor. Zeitschr. 2003. V. 12. № 4. P. 209–216.
22. Logan J.A., Jones D.B.A., Megretskaja I.A. et al. Quasi-biennial oscillation in tropical ozone as revealed by ozonozonde and satellite data // J. Geoph. Res. 2003. V. 108. № D8. 4244. doi:10.1029/2002JD002170.
23. Oltmans S. J. London J. The quasi-biennial oscillations in atmospheric ozone // J. Geoph. Res. 1982. V. 87. P. 8981–8989.
24. Shiotani M. Annual, Quasi-Biennial, and El-Niño–Southern Oscillation (ENSO) time-scale variations in equatorial total ozone // J. Geoph. Res. 1992. V. 97. № D7. P. 7625–7633.
25. Sitnov S.A. QBO effects manifesting in ozone, temperature, and wind profiles // Ann. Geophys. 2004. V. 22. P. 1495–1512.
26. Soukharev B. On the solar/QBO effect on the interannual variability of total ozone and the stratospheric circulation over Northern Europe // J. Atm. Sol. Terr. Phys. 1999. V. 61. № 15. P. 1093–1109.
27. Shindell D., Rind D., Balachandran N. et al. Solar cycle variability, ozone, and climate. // Science. 1999. V. 284. P. 305–308.
28. Zerefos C.S., Tourpali K., Bojkov B.R. et al. Solar activity-total column ozone relationships: Observations and model studies with heterogeneous chemistry // J. Geoph. Res. 1997. V. 102. № D1. P. 1561–1569.
29. Бекорюков В.И., Бугаева И.В., Захаров Г.П. и др. Долгопериодные колебания озона и метеорологических параметров тропосферы и стратосферы как следствие климатообразующих центров действия атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. С. 1243–1249.
30. Звягинцев А.М., Кадыгров Н.Е., Крученицкий Г.М. Анализ временных рядов общего содержания озона по данным спутниковых наблюдений // Исследования Земли из космоса. 2003. №4. С. 29–37.
31. Jadin E.A. Interannual variability of total ozone and stratospheric angular momentum // Intern. J. Geomag. Aeronomy. 1999. V. 1. № 2. P. 169–180.
32. Staehelin J., Mader J., Weiss A.K., Appenzeller C. Long-term ozone trends in Northern mid-latitudes with special emphasis on the contribution of changes in dynamics // Phys. Chem. Earth. 2002. V. 27. P. 461–469.
33. Bronnimann S., Luterbacher J., Scmutz C. et al. Variability of total ozone at Aroza, Switzerland, since 1931 related to atmospheric circulation indices // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27. № 15. P. 2213–2216.
34. Orsolini Y.J., Limpasuvan V. The North Atlantic Oscillation and the occurrences of ozone miniholes // Geoph. Res. Lett. 2001. V. 28. № 21. P. 4099–4102.
35. Angell J.K., Korshover J., Cotten G.F. Quasi-biennial variations in the “centres of action” // Mon. Weath. Rev. 1969. V. 97. № 12. P. 867–872.
36. Нерушев А.Ф. Воздействие интенсивных атмосферных вихрей на озоновый слой Земли. СПб.: Гидрометеиздат, 2003. 223 с.
37. Васин В.Ф., Воробьев В.И. К вопросу распределения общего содержания озона в струйных течениях // Тр. ГГО. 1967. Вып. 184. С. 31–34.
38. Гуцин Г.П., Виноградова Н.Н. Суммарный озон в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 238 с.
39. Еланский Н.Ф. О механизме воздействия струйных течений на озонный слой // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1975. Т. 11. № 9. С. 916–925.
40. Шаламянский А.М., Ромашкина К.И. Распределение и изменение общего содержания озона в различных воздушных массах // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1980. Т. 16. № 12. С. 1258–1265.
41. Krivolutsky A.A., Kiryushov V.M., Vargin P.N. Generation of wave motions in the middle atmosphere induced by variations of solar ultraviolet radiation flux (based on the UARS // Intern. J. Geom. Aeron. 2003. V. 3. № 3. P. 267–279.
42. Hadjinicolaou P., Jrrar A., Pyle J., Bishop L. The dynamically-driven trend in stratospheric ozone over northern middle latitudes // Quart. J. Roy. Met. Soc. 2002. V. 128. № B582. P. 1393–1412.
43. Fusco A.C., Salby M.L. Interannual variations of total ozone and their relationship to variations of planetary wave activity // J. Climate. 1999. V. 12. № 6. P. 1619–1629.
44. Petzoldt K. The role of dynamics in total ozone deviations from their long-term mean over the Northern Hemisphere // Ann. Geophys. 1999. V. 17. P. 231–241.
45. Angell J.K. Impact of El Chichon and Pinatubo on ozonesonde profiles in north extratropics // Geoph. Res. Lett. 1998. V. 25. № 24. P. 4485–4488.
46. Lee H., Smith A.K. Simulation of combined effects of solar cycle, quasi-biennial oscillation, and volcanic forcing on stratospheric ozone changes in recent decades // J. Geoph. Res. 2003. V. 108. № D2. 4049. doi:10.1029/2001JD001503.
47. Randel W.J., Wu F., Russell III J.M. et al. Ozone and temperature changes in the stratosphere following the eruption of Mount Pinatubo // J. Geoph. Res. 1995. V. 100. № D8. P. 16753–16764.
48. Robock A. Volcanic eruptions and climate // Rev. Geoph. 2000. V 38. № 2. P. 191–219.
49. Solomon S., Portmann R.W., Garcia R.R. et al. The role of aerosol variations in anthropogenic ozone depletion at northern mid-latitudes // J. Geoph. Res. 1996. V. 101. № D3. P. 6713–6727.

50. *Нуждина М.А.* Квазидвухлетний цикл в индексах геомагнитной и солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Т. 26. № 5. С. 798–792.
51. *Стеблова Р.С.* Озоновые дыры – результат взаимодействия Солнца и космоса с геомагнитным полем в земной атмосфере // ДАН СССР. 1990. Т. 315. № 5. С. 1097–2001.
52. *Krivolutsky A., Bazilevskaya G., Vyushkova T., Knyazeva G.* Influence of cosmic rays on chemical composition of the atmosphere: data analysis and photochemical modelling // Phys. And Chem. of Earth. 2002. V. 27. P. 471–476.
53. *Lastovieka J., Krizan P., Kudela K.* Cosmic rays and total ozone at higher middle latitudes // Adv. Space Res. 2003. V. 31. P. 2139–2144.
54. *Makarova L., Shirochkov A.* Impact of the solar wind dynamics of the ozone density variations // Adv. Space Res. 2001. V. 27. P. 2013–2018.
55. *McPeters R.D., Jackman C.H.* The response of ozone to Solar proton events during solar cycle 21: the observations // J. Geoph. Res. 1985. V. 90. P. 7495–7954.
56. *Sinnhuber M., Burrows J.P., Chipperfield M.P. et al.* A model study of the impact of magnetic field structure on atmospheric composition during solar proton events // Geoph. Res. Lett. 2003. V. 30. № 15. 1818. doi:10.1029/2003GL017265.
57. *Кашин Ф.В., Арефьев В.Н., Вишератин К.Н. и др.* Результаты экспериментальных исследований радиационно-активных составляющих атмосферы в центре Евразии // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 4. С. 463–492.
58. *Semyonov V.K., Sinyakov V.P., Aref'ev V.N. et al.* Long-term ground-based total ozone measurements in the atmosphere over Tian Shan // Proceed. Quadr. Ozone Symp. Sapporo. 2000. P. 635–636.
59. *Aref'ev V.N., Visheratin K.N., Kashin F.V. et al.* Spectral characteristics of total ozone and vertical temperature distribution in the atmosphere over Issyk Kul (Northern Tien Shan) // Proceed. SPIE. 2003. V. 5027. P. 51–59.
60. *Visheratin K.N., Semenov V. K.* Spectral Structure of Total Ozone Variations over Issyk Kul // Proceed. Quadr. Ozone Symp. Greece, Kos. 2004. P. 460–461.
61. *Семенов В.К., Спекторов Л.А., Тимофеева С.С.* Вариации общего содержания озона в районе озера Иссык-Куль // Атмосферный озон. М.: Наука, 1983. С. 85–88.
62. NASA/Goddard Space Flight Center's Database: <http://toms.gsfc.nasa.gov>.
63. *Брукс К., Карузерс Н.* Применение статистических методов в метеорологии. // Л.: Гидрометеоздат, 1963. 416 с.
64. *Эренберг А.* Анализ и интерпретация статистических данных. М.: Финансы и статистика 1981. 406 с.
65. *Baldwin M.P., Gray L.J., Dunkerton T.J. et al.* The quasi-biennial oscillation. // Rev. Geoph. 2001. V. 39. № 2. P. 179–229.
66. NCEP/NCAR Reanalysis-2 Project, <http://wesley.wvb.noaa.gov>.
67. *Bishop L., Hill W.J.* Analyzing stratospheric ozone for natural and man-made trend variability // Geoph. Res. Lett. 1982. V. 9. № 4. P. 485–488.
68. *Krzyscin J.W.* Interannual changes in the atmospheric ozone derived from ground-based measurements // Paper Meteor. Geoph. 1992. V. 43. № 4. P. 133–164.
69. *Harris J.M., Oltmans S.J., Tans P.P. et al.* New method for describing long-term changes in total ozone // Geoph. Res. Lett. 2001. V. 28. № 24. P. 4535–4538.
70. *Глазков В.Н., Ивановский А.И., Федоров В.В.* Анализ статистической структуры долговременных изменений полей общего содержания озона по данным наземной озонометрической сети // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1997. Т. 33. № 3. С. 348–359.
71. *Appenzeller C., Weiss A.K., Staehelin J.* North Atlantic Oscillation modulates Total Ozone Winter Trends // Geoph. Res. Lett. 2000. V. 27. № 8. P. 1131–1134.
72. *Крученицкий Г.М., Перов С.П.* Исследование глобальных озоносферных процессов методами вейвлет-анализа // Атлас временных вариаций природных, антропогенных, и социальных процессов. Т. 3. Окружающая среда, биосфера и человек. М.: Янус-К. 2003. С. 364–370.
73. *Quadrennial Ozone Symposium.* Proceedings, Greece, Kos, 2004, <http://www.qos2004.gr/proceedings.php>.
74. *Кондратьев К.Я.* Изменения глобального климата: реальность, предположения и вымыслы // Исследования Земли из космоса. 2002. № 1. С. 3–23.
75. *Юдин М.И.* Об изучении факторов, обуславливающих нестационарность общей циркуляции атмосферы // Тр. Межд. симп. “Динамика крупномасштабных атмосферных процессов”. М.: Наука, 1965. С. 213–218.
76. *Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А.* Вейвлеты и их использование // УФН. 2001. Т. 171. № 5. С. 465–501.
77. *Lewalle J.* Tutorial on Continuous Wavelet Analysis of Experimental Data. 1995. // <http://www.ecs.syr.edu/faculty/lewall/tutor/tutor.html>.
78. *Scargle J.D.* Studies in astronomical time series analysis. 2. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // Astrophys. J. 1982. V. 263. P. 835–853.
79. *Kane R.P., Sahai Y., Teixeira N.R.* Maximum entropy spectral analysis of total ozone // Pure Appl. Geoph. 1984/1985. V. 122. P. 747–762.
80. *Kane R.P.* Prediction possibilities of Arosa total ozone // Pure Appl. Geoph. 1987. V. 125. № 1. P. 131–145.
81. *Angell J.K., Korshover J.* Quasi-biennial variations in the temperature, total ozone and tropopause height // J. Atm. Sci. 1964. V. 21. № 5. P. 479–492.
82. *Baldwin M.P., Dunkerton T.J.* Biennial, quasi-biennial, and decadal oscillations of potential vorticity in the northern stratosphere // J. Geoph. Res. 1998. V. 103. № D4. P. 3919–3928.
83. *Gray L.J., Dunkerton T.J.* The role of the seasonal cycle in the quasi-biennial oscillation of ozone // J. Atm. Sci. 1990. V. 47. № 20. P. 2429–2452.
84. *Borisenkov Ye.P., Tsvetkov A.V., Eddy J.A.* Combined effect of Earth orbit perturbations and Solar activity on terrestrial insolation. Part I. Sample days and annual

- mean values // *J. Atm. Sci.* 1985. V. 42. № 9. P. 933–940.
85. Иванов В.В. Периодические колебания погоды и климата // УФН. 2002. Т. 172. № 7. С. 777–811.
86. Shiotani M. Annual, Quasi-biennial, and El Nino-Southern Oscillation (ENSO) time scale variations in equatorial total ozone // *J. Geoph. Res.* 1992. V. 97. № D7. P. 7625–7633.
87. Jiang N., Neelin J.D., Ghil M. Quasi-quadrennial and quasi-biennial variability in the equatorial Pacific // *Climat Dynamics.* 1995. V. 12. № 2. P. 101–112.
88. Kane R.P. Quasi-biennial and quasi-triennial oscillations in geomagnetic activity indices // *Ann. Geoph.* 1997. V. 15. P. 1581–1594.
89. Монин А.С., Шишков Ю.А. О пятилетней цикличности глобальной погоды // ДАН. 1998. Т. 358. № 3. С. 395–398.
90. Baldwin M. P., Tung K. Extratropical QBO signals in angular momentum and wave forcing // *Geoph. Res. Lett.* 1994. V. 21. № 24. P. 2717–2720.
91. Rivin Yu.R. The 22-year cycle of geomagnetic activity // *Intern. J. Geom. Aeron.* 1999. V. 1. № 2. P. 111–116.
92. Abarca del Rio R., Gambis D., Salstein D.A. Interannual signals in length of day and atmospheric angular momentum // *Ann. Geophys.* 2000. V. 18. P. 347–364.
93. Dunkerton T. J. Quasi-biennial and subbiennial variations of stratospheric trace constituents derived from HALOE observations // *J. Atm. Sci.* 2001. V. 58. № 1. P. 7–25.
94. Visheratin K.N. Spatial Characteristics of Total Ozone Annual Oscillation in the Tropics // *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symp. Greece, Kos.* 2004. P. 458–459.
95. Солнечно-земные связи, погода и климат / Под ред. Б. МакКормака и Т. Селги. М.: Мир, 1982. 384 с.
96. Вишератин К.Н., Троянов М.М. Пространственное распределение амплитуды длиннопериодных вариаций общего содержания озона по данным спутниковых измерений // 4-я Всероссийская научная конф. “Физические проблемы экологии (экологическая физика)”. Москва, 22–24 июня. М.: МГУ, 2004. С. 9–10.
97. Bohme W. A change of circulation pattern in middle latitudes in connection with the 26-month cycle // *Тр. Межд. симп. “Динамика крупномасштабных атмосферных процессов.”* М.: Наука, 1965. С. 402–409.
98. Hamilton K., Hertzog A., Vial F., Stenchikov G. Longitudinal variation of stratospheric quasi-biennial oscillation // *J. Atmos. Sci.* 2004. V. 61. № 4. P. 383–402.
99. Echer E. Multi-resolution analysis of global total ozone column // *Ann. Geophys.* 2004. V. 22. P. 1487–1493.
100. Visheratin K.N. Global Maps of Total Ozone QBO from TOMS Data Set. // *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symp. Greece, Kos.* 2004. P. 456–457.
101. Груздев А.Н., Безверхний В.А. Многолетние вариации квазидвухлетней цикличности экваториального стратосферного ветра // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 1999. Т. 35. № 6. С. 773–785.
102. Shapiro P., Ward F. A neglected cycle in sunspot numbers ? // *J. Atm. Sci.* 1962. V. 19. № 5. P. 506–503.
103. Madden R.A. Seasonal variations of the 40–50 day oscillation in the tropics // *J. Atm. Sci.* 1986. V. 43. № 24. P. 3138–3151.
104. Витинский Ю.И., Конецкий М., Куклин Г.В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М.: Наука, 1986. 296 с.
105. Северный А.Б. Некоторые проблемы физики Солнца // М.: Наука. 1988. 224 с.
106. Аллен К.У. Астрофизические величины. М.: Мир, 1977. 446 с.
107. Chandra S. McPeters R.D., Planet W., Nagatani R.M. The 27 day solar UV response of stratospheric ozone: solar cycle 21 vs. solar cycle 22 // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1994. V. 56. № 8. P. 1057–1065.
108. Chandra S. The solar and dynamically induced oscillations in the stratosphere // *J. Geoph. Res.* 1986. V. 91. № D6. P. 2719–2734.
109. Шерстюков Б.Г., Логинов В.Ф. Короткопериодные циклические изменения в нижней атмосфере и гелиогеофизические процессы М.: Гидрометеоиздат, 1986. 87 с.
110. Holton J.R., Mass C. Stratospheric vacillation cycles // *J. Atmos. Sci.* 1976. V. 33. № 11. P. 2218–2225.