

УДК 551.515

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КВАЗИДВУХЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЙ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО СТРАТОСФЕРНОГО ВЕТРА И ПРОБЛЕМА СИНХРОНИЗАЦИИ

© 2010 г. Д. В. Кулямин, В. П. Дымников

Институт вычислительной математики РАН

119991 Москва, ул. Губкина, 8

E-mail: kulyamind@mail.ru, dymnikov@inm.ras.ru

Поступила в редакцию 16.10.2009 г., после доработки 02.12.2009 г.

В работе исследованы спектральные характеристики квазидвухлетних колебаний (КДК) зональной скорости в экваториальной стратосфере по данным реанализов наблюдений NCEP/NCAR и ERA40 и численных экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы (ОЦА) ИВМ РАН. Рассмотрена проблема синхронизации КДК и полугодовых колебаний зональной скорости в мезосфере (ПГК). Показано, что процесс синхронизации к кратным периодам ПГК идентифицируется в области перехода между КДК и ПГК. Для всех высот распространения КДК синхронизация с ПГК выражена при расчете периода по разностям западных максимумов. Показано, что модель ОЦА ИВМ РАН удовлетворительно воспроизводит основные спектральные характеристики КДК и ПГК и особенности изменчивости периода КДК, наблюдаемые по данным реанализов. На основе исследования малопараметрических моделей КДК показана возможность синхронизации с ПГК или годовым циклам в верхних слоях как для механизма поглощения планетарных волн средним потоком, так и для обрушения коротких гравитационных волн. Формирование КДК от разных типов волн вместе с ПГК и годовым циклом можно рассматривать как единую систему колебаний в циркуляции экваториальной верхней атмосферы.

Ключевые слова: квазидвухлетние колебания, полугодовые колебания, синхронизация, спектральный анализ, модели общей циркуляции атмосферы, динамика стратосферы и мезосферы, взаимодействие волн со средним потоком.

ВВЕДЕНИЕ

Для построения современных моделей общей циркуляции атмосферы (ОЦА) необходимо воспроизводить сложные механизмы, формирующие наиболее важные физические процессы, определяющие основные характеристики атмосферного движения. Рассматривая низкочастотную изменчивость атмосферной циркуляции как одно из наиболее важных атмосферных явлений, можно выделить в класс наиболее приоритетных для исследования процессов квазидвухлетние колебания зонального ветра в экваториальной стратосфере (КДК). Большое число исследований показывают существенную роль КДК в формировании глобальной атмосферной циркуляции, поскольку КДК определяют низкочастотную изменчивость экваториальной стратосферной температуры, влияют на крупномасштабную циркуляцию озона и других примесей и воздействуют на средние и высокие широты через модуляцию планетарных волн и меридиональную циркуляцию. Общий обзор этого явления и его роли в глобальной атмосферной циркуляции можно найти в [1]. Все это указывает на необходимость воспроизведения КДК в современных моделях общей циркуляции атмосферы. При этом требуется воспроизводить как ос-

новные характерные особенности самих КДК: диапазон периодов от 20 до 33 месяцев (в среднем 28 месяцев), зону распространения на высотах ~60–10 мбар, несимметричность западной и восточной фаз как по длительности, так и по пространственному расположению, медленное опускание разнонаправленных фаз скорости со скоростью 1 км/мес, амплитуды зональной скорости и их распределение с максимумами около 30 м/с на высотах порядка 20–10 мбар), так и влияние КДК на другие атмосферные процессы.

Однако до сих пор лишь немногие модели общей циркуляции адекватно реализуют КДК. В работе [2] авторы данной работы исследовали механизмы формирования КДК с помощью различных малопараметрических моделей, а в работе [3] была подробно рассмотрена задача воспроизведения этого явления в моделях общей циркуляции атмосферы ИВМ РАН. Несмотря на то, что в результате была построена модель общей циркуляции, достаточно реалистично воспроизводящая КДК, в процессе изучения механизмов формирования основных характеристик КДК возник целый ряд вопросов, связанных с относительной ролью различных атмосферных процессов в реализации этого явления.

В настоящее время считается общепринятым, что в основе КДК лежит нелинейное взаимодействие волн с зональным потоком. Можно разделить (как это сделано в работе [2]) волновые процессы по масштабу и рассматривать два механизма формирования КДК: взаимодействие длинных волн с зональным потоком и коротких гравитационных волн за счет обрушения. В работе [2] было показано, что каждый механизм при определенных параметрах способен воспроизвести КДК. Однако, принимая во внимание, что реальной энергии планетарных волн недостаточно для возбуждения КДК [1, 4], а короткие гравитационные волны при разумных значениях параметров могут возбудить колебания только со значительно меньшими периодами и большими амплитудами, можно сделать вывод, что наиболее вероятным процессом поддержания КДК является процесс взаимодействия волн с зональным потоком в широком спектральном диапазоне. В [2] также было показано, что взаимодействие коротких гравитационных волн и планетарных волн со средним потоком в общем разделяется и пространственно: основное взаимодействие коротких волн происходит в верхней стратосфере и мезосфере, а планетарных — в средней и нижней стратосфере, а основная роль гравитационных волн состоит в подкачке энергии. Эти результаты вместе с полученными необходимыми условиями воспроизведения КДК в моделях ОЦА (высокое пространственное разрешение для реализации механизма поглощения планетарных волн на критических уровнях, соответствующие каждому типу волн диапазоны величин параметров, дающие реалистичные КДК) мы перенесли на проблему реализации этих механизмов в трехмерных моделях общей циркуляции атмосферы ИВМ РАН, которая рассмотрена в [3]. Разделение волн на масштабы естественным образом было перенесено на модель ОЦА, поскольку формирование и распространение планетарных волн является в ней внутренним процессом, а для реализации поглощения коротких гравитационных волн использовалась параметризация, как и в малопараметрической модели.

Однако при исследовании КДК, как было упомянуто выше, остается ряд вопросов, требующих своего решения, среди которых наиболее существенной является проблема формирования периода колебаний, его устойчивости и его связи с полугодовой и годовой гармониками.

В некоторых работах [5–8] отмечается, что при вариации периодов предпочтительные периоды КДК по данным анализа наблюдений на отдельных высотах близки к 2 годам и 2.5 годам, в некоторых случаях даже к 3 годам (т.е. кратны полугоду). В работе [5] для объяснения этого явления, как и всего феномена КДК, была предложена идея параметрического резонанса, однако для этого необходимо уже иметь осциллятор с двухлетним периодом колебаний. В некоторых работах указывается, что смена происходит также с периодичностью порядка 5 лет

[9] или 10 лет [6, 7, 10]. В работах [6, 7, 9, 10] и других, касающихся солнечно-земной физики, говорится о прямой связи 11-летнего солнечного цикла и КДК зонального ветра, при этом предлагается идея, что оба эти феномена являются частью более сложного реального физического механизма. Заметим, что за период наблюдений 44 года достаточно сложно говорить о каком-то влиянии 11-летних колебаний. С другой стороны, в других работах [1, 11] не говорится о предпочтительных периодах КДК, однако выделяется некоторое возможное взаимодействие КДК с сезонным циклом на экваторе, при этом указывается, что это скорее статистическая тенденция, чем строгая синхронизация. Механизм дискретной изменчивости периода КДК по данным наблюдений является темой современных дискуссий [7, 8, 12–14]. Отметим, что в численных экспериментах, описанных в работе [3] при некоторых значениях различных параметров мы также получали периоды, кратные полугоду.

В целом результаты численных экспериментов с моделями общей циркуляции ИВМ РАН показали, что процесс формирования периода, амплитуды и других характеристик квазидвухлетнего цикла далеко не однозначен и объединяет несколько принципиально различных физических процессов, тесно взаимодействующих друг с другом. Помимо отмеченного выше основополагающего механизма нелинейного взаимодействия экваториальных волн разных масштабов с зональным потоком, существенный вклад в формирование КДК могут вносить полугодовые колебания (ПГК), которые, начиная с верхних слоев стратосферы, распространены в экваториальной мезосфере, а также сезонный цикл, присутствующий в цикле зональной скорости на экваторе в основном в тропосфере и доминирующий в средних широтах [11]. Уже в первых работах по теории КДК [15, 16] высказана гипотеза о некоторой синхронизации КДК и ПГК при смене режимов ветра, однако в работе [15] на основе малопараметрической модели показано, что наличие ПГК не критично для величины периода КДК (результаты работы [2] также соответствуют этому выводу). Подробно эта проблема рассмотрена в работе [17], в которой показана синхронность начала западных фаз КДК и ПГК в верхней стратосфере на основе данных наблюдений и моделирования. Как следствие, высказана идея о соответствии отдельных периодов КДК кратному числу периодов ПГК на всех высотах, т.е. о решающей роли ПГК в формировании периода КДК.

Таким образом, исходя из представленного выше обзора видно, что на данный момент не существует единого мнения по поводу основных причин окончательного формирования периода КДК, при этом существует ряд противоречащих друг другу гипотез.

Как отмечено выше, КДК является следствием взаимодействия волн со средним потоком в широ-

ком диапазоне, причем формирующим механизмом в нижней и средней стратосфере является взаимодействие длинных волн со средним потоком, а в верхней стратосфере на первый план выходят короткие гравитационные волны. В работе [18] ПГК рассматриваются как следствие взаимодействия планетарных волн со средним течением на уровне стратосферы, при этом о наличии КДК в стратосфере не упоминается. Несмотря на то, что полной теории ПГК, по нашему мнению, не существует, можно предположить, что короткие волны, проходя в мезосферу, также передают энергию ПГК, что подтверждается численными экспериментами с версией модели ИВМ РАН с грубым разрешением [3]. Как следствие, процесс обрушения коротких гравитационных волн может выступать связующим звеном между КДК и ПГК. Таким образом, КДК и ПГК можно рассматривать как одну систему циркуляции экваториального ветра, поэтому процесс синхронизации, рассмотренный в работе [17], кажется естественным в верхней стратосфере, причем важным посредником в данном процессе должны быть короткие гравитационные волны. В то же время синхронизация КДК и ПГК в верхних слоях стратосферы не означает, что период КДК на всех высотах постоянен и определяется кратным числом ПГК, как это предполагается в [17]. Отметим, что в этой работе подробно рассмотрены лишь верхние слои стратосферы, при этом используется только параметризация поглощения планетарных волн во всей стратосфере, короткие же волны не рассматриваются. В целом остается открытой проблема изучения статистических и спектральных характеристик временных рядов зонального ветра на экваторе с выделением особенностей изменчивости периода и структуры КДК.

Основной целью данной работы является проверка на основе анализа данных наблюдений, а также результатов численных экспериментов с малопараметрическими моделями [2] и моделью общей циркуляции ИВМ РАН [3] приведенной выше концепции: КДК и ПГК можно рассматривать как одну систему циркуляции экваториального ветра, важным источником которой являются короткие гравитационные волны.

Коротко остановимся на содержании работы. В первом параграфе обсуждаются используемые в работе ряды данных наблюдений и данных численного моделирования, а также методы их обработки.

Во втором параграфе мы приводим простые аналитические оценки зависимости периода КДК, возбуждаемого планетарными волнами, от различных атмосферных параметров, позволяющие в принципе оценивать возможные колебания периодов, а также результаты численных экспериментов с малопараметрическими моделями [2], позволяющими утверждать, что синхронизация КДК и ПГК в верхней стратосфере может осуществляться через меха-

низм взаимодействия волн со средним потоком в широком спектральном диапазоне, в частности, и через механизм взаимодействия коротких гравитационных волн со средним потоком.

В третьем параграфе статьи приводятся результаты обработки данных наблюдений и данных моделирования, полученных на основе модели ОЦА ИВМ РАН, для различных высот (спектры и гистограммы), которые показывают, что определенная синхронизация фаз ПГК и КДК имеет место.

В заключении кратко излагаются и обсуждаются полученные в работе основные результаты.

1. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ, МОДЕЛИРОВАНИЯ И МЕТОДЫ ИХ ОБРАБОТКИ

Исследование спектральных характеристик КДК и их возможной связи с ПГК и сезонным циклом в настоящей работе проводилось на основе анализа данных наблюдений экваториального зонального ветра в стратосфере и мезосфере, а также данных численных экспериментов с моделью ОЦА ИВМ РАН.

В качестве данных “наблюдений” использовались данные реанализа американских центров NCEP/NCAR, детально описанного в работах [19, 20], а также данные реанализа европейского центра ECMWF (ERA40) [21]. В реанализе NCEP/NCAR использовались среднемесячные данные о зональном ветре на экваторе с 1956 по 2004 г., на p -поверхностях (уровнях постоянного давления) до уровня 10 мбар включительно (верхняя стратосфера). Данные ERA40 взяты с 1956 по 2002 г., на p -поверхностях до уровня 1 мбар, что включает мезосферу. Таким образом, данные NCEP/NCAR охватывают КДК не полностью и не содержат ПГК, с другой стороны, ERA40 содержат полные по высоте КДК, а также ПГК.

В работе [22] приведено подробное сравнение данных ракетного зондирования и трех различных реанализов наблюдений в отношении воспроизведения динамики тропической стратосферы. Отмечено, что наиболее репрезентативными для изучения КДК и сезонного цикла на экваторе являются реанализы NCEP/NCAR и ERA40, при этом ERA40 ближе к реальности в верхней стратосфере. В работе [23] детально исследована репрезентативность данных ERA40 и показано, что в верхних слоях тропический ветер воспроизводится достаточно хорошо вплоть до высот 2–3 мбар, на которых уже нет КДК, а доминируют ПГК и сезонный цикл.

Версия модели ОЦА ИВМ РАН $2^\circ \times 2.5^\circ \times 80$, воспроизводящая КДК, подробно описана в работе [3]. Модель содержит 80 вертикальных уровней по σ -координате до верхней границы 0.003 мб, горизонтальное разрешение 2° по широте и 2.5° по долготе. Важно отметить, что в этой модели процесс ге-

нерации, распространения и поглощения планетарных волн является внутренним, а процесс обрушения гравитационных волн в верхних слоях атмосферы рассчитывается с помощью параметризации, предложенной Хайнсом [2, 24].

В настоящей работе, в отличие от результатов работы [3], для исследования характеристик КДК и сравнения с наблюдениями использованы данные численного эксперимента с моделью ОЦА ИВМ РАН с переменным по высоте параметром вертикальной диффузии в атмосфере в диапазоне широт от 10°S до 10°N : (Φ – безразмерный параметр, определяющий коэффициент вертикальной диффузии в модели ОЦА ИВМ РАН [3, 24], $\Phi = 0.05$ в области 500 мбар–6 мбар, $\Phi = 0.15$ в области 6 мбар–0.7 мбар, $\Phi = 0.25$ в остальной атмосфере). Все остальные параметры модели брались стандартными [3]. Длительность расчета составила 100 модельных лет. При таком выборе параметров была смоделирована экваториальная динамика, наиболее близкая к наблюдаемой.

На рис. 1 приведена высотно-временная картина КДК зонального ветра в стратосфере и мезосфере на экваторе по используемым в этой работе данным реанализов наблюдений ERA40, NCEP/NCAR, а также численного эксперимента с моделью ОЦА ИВМ РАН. Для удобства сравнения выбран одинаковый временной интервал – 10 лет, данные наблюдений взяты с 1981 по 1991 гг., данные модели с 50-го года счета. Несмотря на некоторое видимое различие в амплитудах, временные характеристики КДК по данным реанализов практически идентичны. Модель ИВМ РАН хорошо воспроизводит как структуру, так и основные характеристики КДК и ПГК, слегка занижая последние по амплитуде и завышая нижнюю границу их формирования.

Исследование свойств КДК и других периодических процессов на экваторе проводилось с помощью спектрального анализа описанных выше трех рядов данных об эволюции зонального ветра, а также построения гистограмм. Использовался Фурье-анализ временных рядов зонально-осредненной зональной скорости на экваторе $u(t)$. На каждой p -поверхности спектральная мощность рассчитывалась по формуле:

$$E_u(\omega) = \frac{1}{4\pi^2} \left[\left(\int_0^{2\pi} u(t) \cos(\omega t) dt \right)^2 + \left(\int_0^{2\pi} u(t) \sin(\omega t) dt \right)^2 \right], \quad (1.1)$$

где $t = \frac{2\pi}{T'} t'$ – нормализованное время, t' – время, T' – полная длина соответствующих рядов данных (в месяцах). Заранее не проводились фильтрации сезонного цикла и других гармоник, что огрубляет

картину по мощности, однако дает более полную картину по частотам. Спектр экваториального ветра рассчитывался для всех данных в высотной области от нижней границы атмосферы (1000 мбар) до высоты 1 мбар (10 мбар для NCEP/NCAR реанализа). Строилось высотное распределение спектральной мощности $E_u(T(\omega))$ по периодам гармоник $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

Анализ характеристик указанных временных рядов мы проводили также с помощью гистограмм для наиболее значимых с точки зрения воспроизведения КДК p -уровней (в соответствии с рис. 1): 50 мбар – область экстремума амплитуд КДК в нижней стратосфере, 20 мбар – область экстремума амплитуд КДК в верхней стратосфере, 10 и 5 мбар (кроме NCEP/NCAR) – переходная зона между ПГК и КДК и область их предположительной синхронизации. Рассчитывались время наступления максимумов восточной и западной фазы зонального ветра, а также время перехода величины зональной скорости через ноль (от западного ветра к восточному и наоборот). При этом использовалось два варианта ряда: простые данные и с фильтрацией среднего за весь ряд сезонного цикла. Период КДК рассчитывался для каждого ряда разными способами. Обозначим через T_{\max}^w и T_{\max}^e периоды, рассчитанные как разность ближайших западных или восточных максимумов соответственно для фильтрованного ряда данных (для нефильтрованного ряда соответствующие обозначения $T_{\max}^{w'}$ и $T_{\max}^{e'}$). Также период КДК рассчитывался как разница между переходами через ноль для фильтрованного ряда данных, что удобно для сравнения с результатами многих работ [1, 7, 9, 17]. Поскольку для анализа использовались среднемесячные данные, при смене знака скорости временем перехода через ноль считался месяц, в котором зональная скорость ближе к нулю. При этом разницу между переходом от восточной к западной фазе обозначим как T_0^w , а от западной к восточной – T_0^e (для нефильтрованного ряда соответствующие обозначения $T_0^{w'}$ и $T_0^{e'}$). Оценивались длительности западной и восточной фазы (как интервалы между переходами зонального ветра через ноль).

2. МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КДК: ОЦЕНКИ ПЕРИОДОВ И ПРОБЛЕМА СИНХРОНИЗАЦИИ

Проблему изменчивости периода КДК и синхронизации КДК и ПГК можно изучать на основе простых малопараметрических моделей взаимодействия волн со средним потоком, используемых нами в работе [2]. Поскольку результаты численных экспериментов с совместной моделью поглощения планетарных и коротких гравитационных волн показывают, что определяющими (в смысле формирования периода КДК) являются планетарные волны,

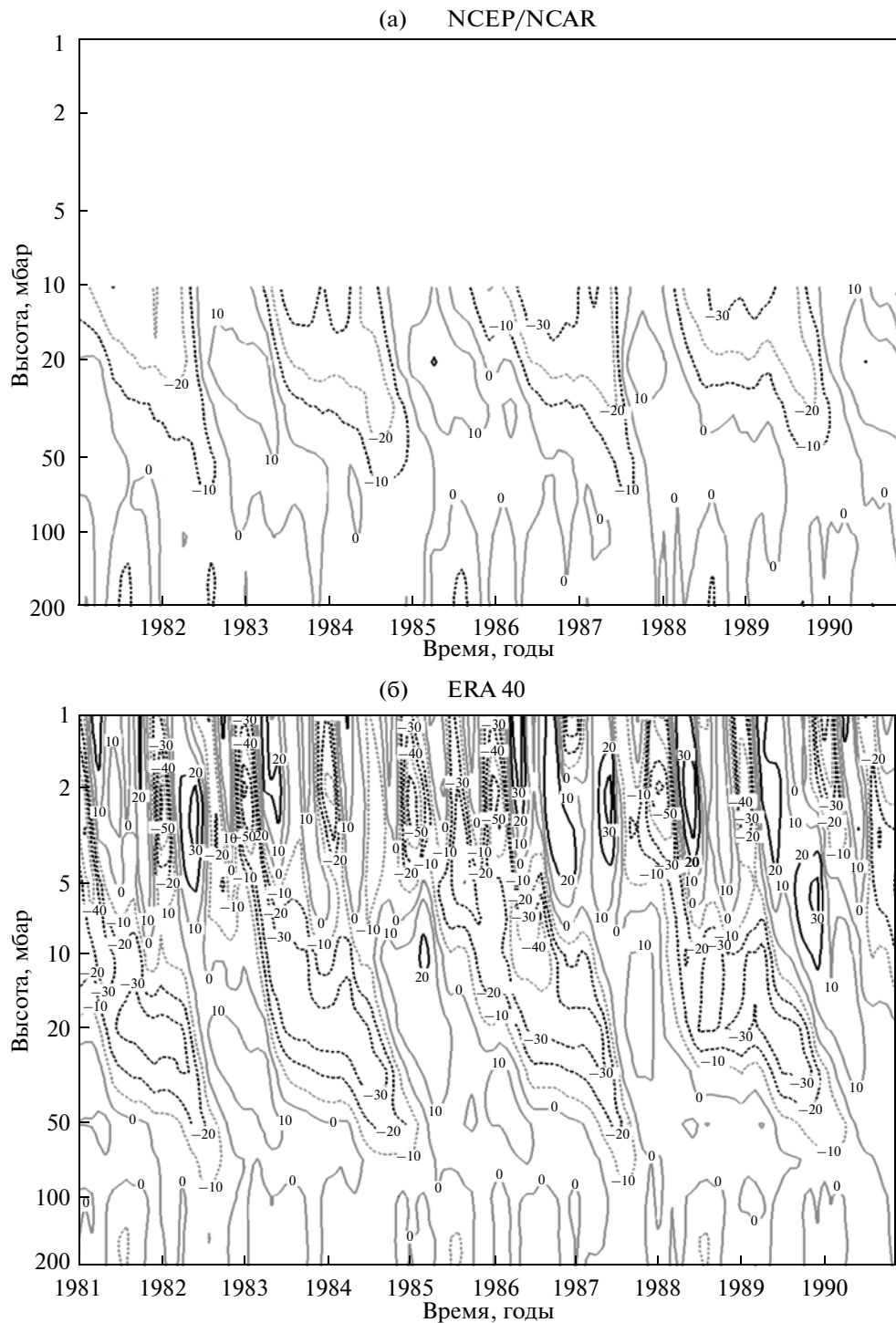


Рис. 1. Зональный ветер на экваторе в высотной зоне от 200 до 1 мбар за 10 лет по данным реанализов наблюдений NCEP/NCAR (а), ERA40 (б) с 1981 г., а также по данным расчета модели ОЦА ИВМ РАН (в). Изолинии проведены с интервалом 5 м/с, пунктиром выделены зоны восточного ветра (отрицательное направление).

то в первую очередь в качестве исследуемой модели КДК необходимо взять рассмотренную нами модель Пламба [2, 25]. Прежде чем перейти к изложению результатов численных экспериментов с малопараметрическими моделями обоих типов волнового

взаимодействия, рассмотрим основные уравнения этой модели и проведем аналитические оценки влияния волновых параметров на период получаемых колебаний и их возможной роли в процессах синхронизации.

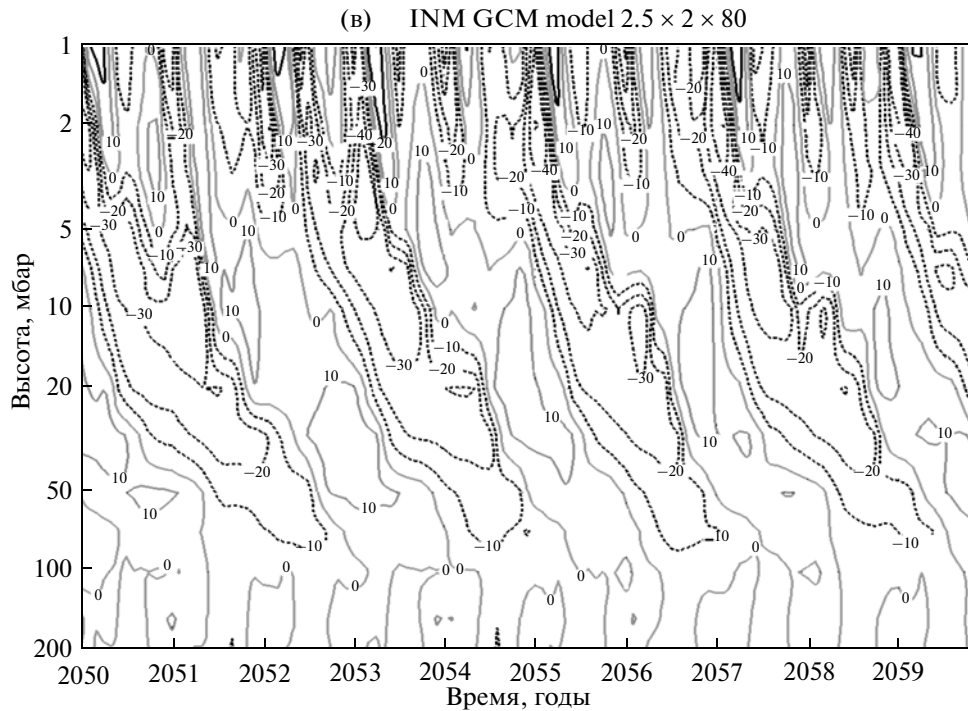


Рис. 1. Продолжение.

Проблему возможной синхронизации периода КДК с внешними циклами (ПГК и сезонным) можно рассматривать с двух сторон: как отклик на соответствующие периодические вариации волновых параметров или как внешнее воздействие, обусловленное нелинейным волновым потоком $-\frac{\partial u'v'}{\partial y}$ или меридиональным переносом зонального ветра. Поэтому для оценок этого воздействия будем рассматривать модифицированную (по сравнению с [2]) модель Пламба. Уравнение для эволюции зонально-осредненной зональной скорости u' имеет вид:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \sum_n \frac{\partial \bar{F}_n}{\partial z} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} + f(z, t), \quad (2.1)$$

$$z \in [0, H], \quad \bar{u}|_{z=0} = 0, \quad \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}|_{z=H} = 0, \quad \bar{u}|_{t=0} = u_0(z).$$

В модели рассматриваются две симметричные разнонаправленные волны с потоками количества движения, передаваемыми среднему течению:

$$\bar{F}_{1,2}(z) = \rho \bar{F}_{1,2}(0) \exp \left\{ -\int_0^z \frac{N\nu}{k_{1,2}(\bar{u} - c_{1,2})^2} dz' \right\}. \quad (2.2)$$

Здесь $\bar{F}(0)$ – поток волновой энергии, генерируемой на уровне тропопаузы ($\bar{F}_1(0) = -\bar{F}_2(0) = F_0$), уровень тропопаузы принимаем за 0, H – высота рассматриваемой области; N – частота Брента-Вей-

ссяля, $c_{1,2}$ – фазовые скорости планетарных волн Кельвина и смешанных Россби-гравитационных волн соответственно (для простоты $c_1 = -c_2 = c$), $k_{1,2}$ – их горизонтальные волновые числа ($k_1 = -k_2 = k$), ν – скорость радиационного выхолаживания в стратосфере, μ – коэффициент вертикальной диффузии, $f(z, t)$ – внешнее воздействие, имитирующее роль ПГК или сезонного цикла.

Для аналитических оценок периода КДК будем предполагать, что профиль колебаний зональной скорости в модели уже сформировался. Рассмотрим простую схему смены направления фаз, для которой в зависимости от фазы мы полагаем (при вычислении интегралов) $u \sim \pm c$ при $z > h(t)$ и $z < h(t)$ соответственно (при этом предполагается, что $\|f\|$ – мала), $u = 0$ при $z = h(t)$, где $h(t)$ – граница области опускания фазы, $\frac{\partial h(t)}{\partial t}$ – скорость опускания фаз КДК. Будем считать, что $h(t') = 0$ в момент $t' = \frac{T}{2}$, т.е. когда одна из фаз достигает нижней границы, сразу начинается формирование противоположной фазы колебаний. В силу симметрии модели длительность каждой фазы равна $\frac{T}{2}$, где T – период установившихся колебаний.

Будем рассматривать процесс формирования положительной фазы колебаний $u|_{z > h(t)} = c$. Считаем при этом, что смена направления ветра происходит

практически мгновенно (на высоте $h(t)$). В этом случае мы можем положить $u|_{z < h(t)} = -c$. Рассматриваемый профиль зональной скорости представлен на рис. 2. Изменение скорости в узкой области критического уровня (ε -окрестности $h(t)$), в которой происходит смена фаз колебаний, при вычислении интегралов несущественно (считаем $\varepsilon \ll 1$). Проинтегрируем первое уравнение (2.1) от $h(t)$ до H :

$$\int_{h(t)}^H \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} dz = -F_0 \sum_{n=1,2} \left(\exp \left\{ - \int_0^z \frac{N \nu}{k_n (\bar{u} - c_n)^2} dz' \right\} \right)_{H} + \left(\exp \left\{ - \int_0^z \frac{N \nu}{k_n (\bar{u} - c_n)^2} dz' \right\} \right)_{h(t)} + \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \Big|_H - \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \Big|_{h(t)} + \int_{h(t)}^H f(z, t) dz \quad (2.3)$$

Для верхней границы примем условия записания

$$\text{начального потока } F_0 \exp \left\{ - \int_0^z \frac{N \nu}{k_n (\bar{u} - c_n)^2} dz' \right\} \Big|_H = 0.$$

Поскольку $\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \Big|_H = 0$, то уравнение (2.3) приобретает вид:

$$\int_{h(t)}^H \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} dz = F_0 \sum_{n=1,2} \left(\exp \left\{ - \int_0^{h(t)} \frac{N \nu}{k (\bar{u} - c_n)^2} dz' \right\} \right) - \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \Big|_{h(t)} + \int_{h(t)}^H f(z, t) dz.$$

Далее $\frac{\partial}{\partial t} \int_{h(t)}^H \bar{u} dz = \int_{h(t)}^H \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} dz + \bar{u}_H \frac{\partial H}{\partial t} - \bar{u}_{h(t)} \frac{\partial h}{\partial t}$, т.к.

$H = \text{const}$ и $\bar{u}_{h(t)} = 0$. В соответствии с рассматриваемой схемой смены фаз колебаний в области от 0 до $h(t)$ отрицательная волна (с фазовой скоростью $-c$) заперта фоновым отрицательным потоком и не вносит вклад в движение, т.к. $u = -c$, при этом для положительной волны имеем оценку

$$\exp \left\{ - \int_0^{h(t)} \frac{N \nu}{k (\bar{u} - c)^2} dz' \right\} = \exp \left\{ - \int_0^{h(t)} \frac{N \nu}{4kc^2} dz' \right\}.$$

Следовательно,

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{h(t)}^H \bar{u} dz \approx F_0 \exp \left\{ - \int_0^{h(t)} \frac{N \nu}{4kc^2} dz' \right\} - \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \Big|_{h(t)} + \int_{h(t)}^H f(z, t) dz \quad (2.4)$$

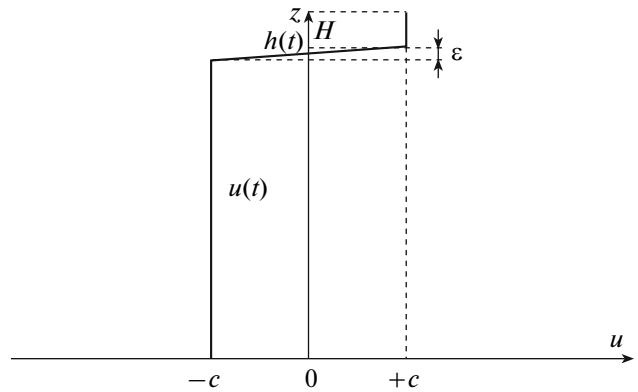


Рис. 2. Профиль зональной скорости, используемый для аналитических оценок периода колебаний в модели Пламба.

Проинтегрируем (2.4) от 0 до $\frac{T}{2}$:

$$\int_{h(\frac{T}{2})}^H \bar{u} dz \Big|_{t=\frac{T}{2}} - \int_{h(0)}^H \bar{u} dz \Big|_{t=0} = F_0 \int_0^{\frac{T}{2}} \exp \left\{ - \int_0^{h(t)} \frac{N \nu}{4kc^2} dz' \right\} dt - \int_0^{\frac{T}{2}} \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \Big|_{h(t)} dt + \int_0^{\frac{T}{2}} \int_{h(t)}^H f(z, t) dz dt.$$

Поскольку при $t = 0$ $h = H$, а при $t = \frac{T}{2}$ $h = 0$, то

$$\int_0^H \bar{u} dz \Big|_{t=\frac{T}{2}} = F_0 \int_0^{\frac{T}{2}} \exp \left\{ - \frac{N \nu}{4kc^2} h(t) \right\} dt - \int_0^{\frac{T}{2}} \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \Big|_{h(t)} dt + \frac{1}{T} \left(T \int_0^{\frac{T}{2}} \int_{h(t)}^H f(z, t) dz dt \right) \quad (2.5)$$

Далее, по теореме о среднем имеем

$$\int_0^{\frac{T}{2}} \exp \left\{ - \frac{N \nu}{4kc^2} h(t) \right\} dt = \frac{T}{2} \exp \left\{ - \frac{N \nu}{4kc^2} h^* \right\}, \text{ где } h^* \in [0, H]$$

и, следовательно, $\exp \left\{ - \frac{N \nu}{4kc^2} h^* \right\} \in \left[\exp \left\{ - \frac{N \nu}{4kc^2} H \right\}, 1 \right]$;

аналогично $\int_0^{\frac{T}{2}} \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \Big|_{h(t)} dt = \frac{T}{2} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \Big|_{h^{**}} \right)$. Величину H

можно определять в терминах $\frac{c^2}{kN\nu}$, как это сделано

в [25]. При характерных для экваториальной стратосферы значениях величин c, k, N, ν

$$\frac{c^2}{kN\nu} \sim 10 \text{ км.}$$

Мы принимаем в первом приближении при $u = c$

при $z > h(t)$, следовательно $\int_0^H \bar{u} dz \Big|_{t=\frac{T}{2}} = cH$ и, таким образом, из (2.5) следует

$$T = \frac{2cH \exp\left\{-\frac{N\nu}{4kc^2}h^*\right\}}{F_0 - \exp\left\{-\frac{N\nu}{4kc^2}h^*\right\} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)_{h^*} + \frac{2}{T} \exp\left\{-\frac{N\nu}{4kc^2}h^*\right\} \int_0^{\frac{T}{2}} \int_{h(t)}^H f(z, t) dz dt} \quad (2.6)$$

Аппроксимируя экспоненту средним арифметическим между ее границами $\exp\left\{-\frac{N\nu}{4kc^2}h^*\right\} = \frac{1}{2} \left(\exp\left\{-\frac{N\nu}{4kc^2}H\right\} + 1 \right) = \beta$ из этой формулы нетрудно получить оценку для периода колебаний без учета

диффузии и внешнего воздействия $T = \frac{2c\gamma \frac{kc^2}{N\nu} \beta}{F_0}$, где

$H = \gamma \frac{kc^2}{N\nu}$. Возьмем $\gamma = 4$ (как это сделано в работе [25]), тогда $\beta = \frac{1}{2}(e + 1) \approx 1.85$

$$T \approx 14.8 \frac{kc^3}{F_0 N \nu}, \quad (2.7)$$

т.е. мы получили оценку периода КДК, практически точно совпадающую с формулой из работы [25], в которой коэффициент 14 был получен экспериментально.

Это означает, что наши аппроксимационные формулы вполне удовлетворительны. Из (2.6) также видно, что если мы зафиксируем H , то зависимость периода от c будет линейной. Кубическая зависимость от c возникает, если мы одновременно будем менять c и H , полагая $\gamma = \text{const}$. Таким образом, полученные оценки находятся в полном согласии с результатами численных экспериментов (см. рис. 3 в работе [2]).

Далее в соответствии с (2.6) качественно оценим вклад периодического внешнего воздействия, которое имитирует роль ПГК (или годового цикла) в формировании КДК. Пусть $f(z, t)$ – периодическая гармоническая функция с периодом T_f (для ПГК $T_f = 6$ месяцев, а для годового цикла соответственно $T_f = 12$ месяцев).

Обозначим $T_0 = \frac{2cH \exp\left\{-\frac{N\nu}{4kc^2}h^*\right\}}{F_0 - \exp\left\{-\frac{N\nu}{4kc^2}h^*\right\} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)_{h^*}}$ (бу-

дем называть эту величину собственным периодом КДК), пусть $T_0 = nT_f + \varepsilon$, где n – целое число, а $|\varepsilon| < T_f$. Если в качестве первого приближения к T взять T_0 , и $T_0 > nT_f$ (т.е. $\varepsilon > 0$), то полагая в формуле (2.6) $f(z, \varepsilon) > 0$ получим, что $T = T_0 - \delta$, т.е. T станет ближе к nT_f . Если $\varepsilon < 0$, то процесс будет идти с периодом $T = T_0 + \delta$, т.е. станет ближе к $(n + 1)T_f$. Таким образом, качественный анализ показывает элементы синхронизации. Уровень синхронизации, естественно, зависит от соотношения между амплитудой $f(z, t)$ и F_0 .

Отметим, что численные эксперименты с данной моделью показали, что зависимость параметров этой модели от годового цикла или ПГК слабо влияла на период колебаний при разумных границах вариаций параметров, при этом эти вариации существенно отражались на величине и времени появления максимумов амплитуд.

Остановимся на наиболее существенных с точки зрения вопроса синхронизации КДК и ПГК результатах численных экспериментов с модифицированной моделью Памба (2.1)–(2.2). Для имитации ПГК в уравнении (2.1) в некоторой высотной области $z \in [h_f, H]$ внешнее воздействие задавалось как $f(z, t) = u_f \frac{2\pi}{T_f} \cos\left(\frac{2\pi}{T_f}t\right)$, где u_f – амплитуда ПГК, h_f – условная нижняя граница ПГК, T_f месяцев – период внешнего воздействия.

На рис. 3 представлен профиль собственных колебаний зональной скорости в модели без внешнего воздействия ($f(z, t) = 0$), а также профиль колебаний при тех же параметрах модели с внешним воздействием в некоторой области, имитирующем реалистичные ПГК. Параметры модели взяты таким образом, что собственный период колебаний $T_0 = 17.2$ месяца на высоте 10 км (в численном эксперименте без внешнего воздействия). При наличии

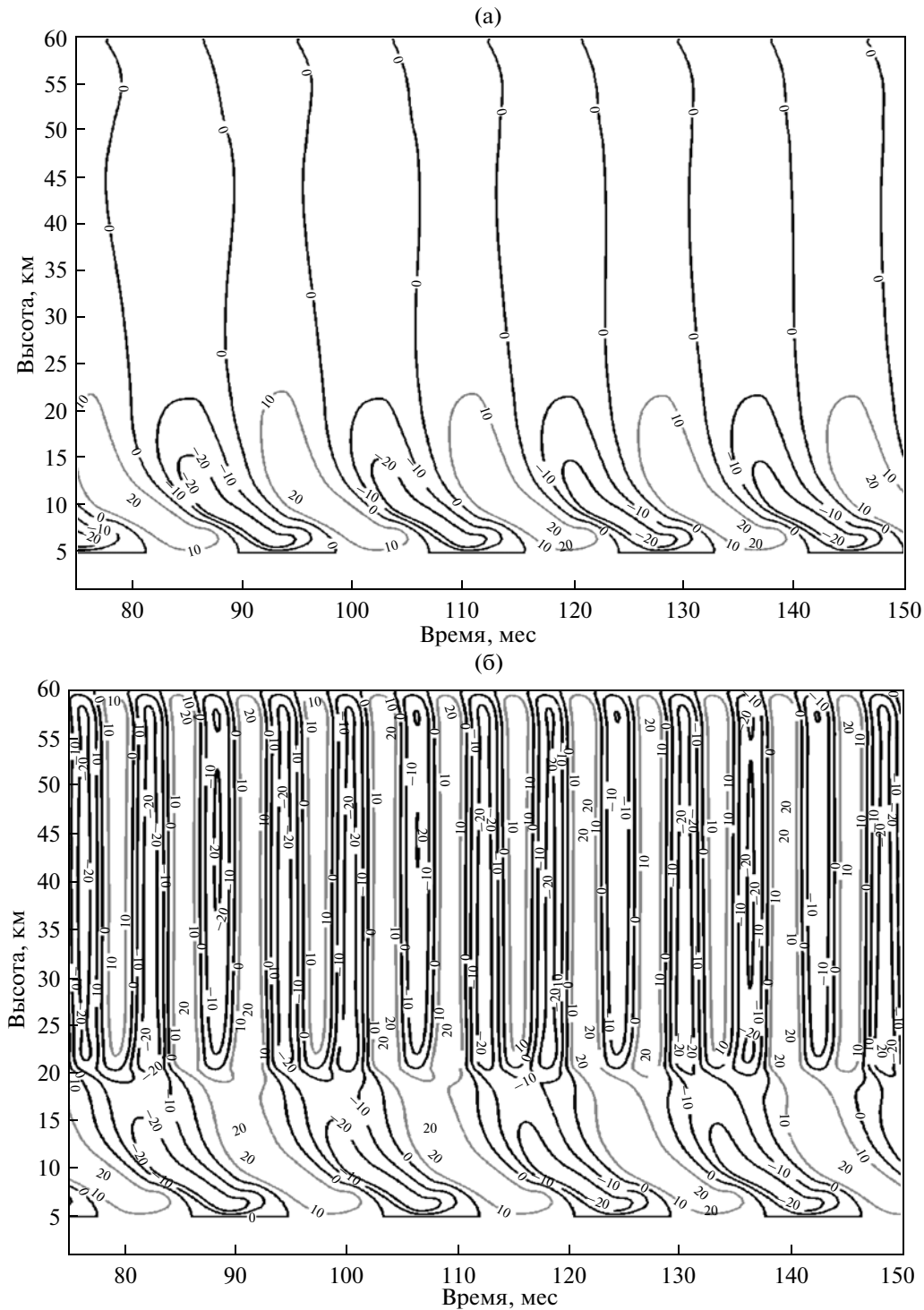


Рис. 3. Профиль зональной скорости, полученный численным решением модели Пламба с параметрами $c = 30$ м/с, $k = 3.14 \times 10^{-7}$ м⁻¹, $F_0 = 3 \times 10^{-2}$ м²/с², $\nu = 10^{-6}$ с⁻¹, $\mu = 0.3$ м²/с без (а) и с периодическим внешним воздействием (б) со значениями амплитуды и периода: $u_f = 20$ м/с, $T_f = 6$ мес и высотой нижней границы $h_f = 20$ км. Величина скорости приведена в м/с, изолинии проведены с интервалом 10 м/с, темным выделены зоны западного ветра (отрицательное направление).

внешних ПГК хорошо наблюдается синхронизация в некоторой области в районе нижней границы ПГК $h_f = 20$ км, при этом важно отметить, что в нижней

области сохранились собственные колебания модели Пламба (период колебаний на высоте 10 км $T = 17.1$ мес). В переходной области происходит син-

хронизация начала фазы собственных колебаний с соответствующей фазой ПГК, при этом из рисунка видно, что при наличии внешнего воздействия фаза колебаний сдвигается во времени. Этот результат соответствует наблюдаемой картине и очень близок к результатам, обсуждаемым в работе [17].

Полученные результаты в численных экспериментах с другими значениями амплитуды и нижней границы внешних ПГК показывают, что синхронизация наблюдается при малых величинах $h_f \leq 30$ км при условии, что внешний цикл попадает в область воздействия волн на средний поток. При этом подобная рис. 3б картина возможна только при сравнительно невысоких амплитудах ПГК, при достижении критических значениях амплитуд $u_f \sim c$ два цикла разделяются.

Мы уже упоминали, что модель Пламба описывает взаимодействие с зональным потоком длинных планетарных волн, которые практически полностью поглощаются в нижних слоях стратосферы [2, 25]. Взаимодействие с верхними слоями стратосферы осуществляется, скорее всего, через процессы, связанные с вертикальной диффузией.

В работе [2] также отмечено, что чем короче волна, тем более высокой верхней границы достигают колебания зонального ветра в модели Пламба. Представленный на рис. 3 результат соответствует волнам с числом $k = 2$, при этом нижняя граница внешних ПГК существенно занижена по сравнению с реальными данными ($h_f = 20$ км, в то время как в природе ПГК начинаются с высот порядка 40 км).

Поскольку в верхних слоях экваториальной стратосферы существенную роль играют короткие волны, которые, как отмечено выше, могут вносить вклад в образование ПГК и процесс синхронизации КДК и ПГК, представляется целесообразным проведение аналогичных экспериментов с моделью взаимодействия зонального потока и коротких гравитационных волн. Для учета действия ПГК (или годового хода) по аналогии с моделью (2.1) модифицируем модель взаимодействия коротких гравитационных волн со средним потоком, предложенную в [2]. Уравнение эволюции зонально-осредненной зональной скорости \bar{u} с учетом внешнего воздействия будет иметь вид:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \sum_n \frac{\partial F_{Hines}}{\partial z} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} + f(z, t), \quad (2.1)$$

$$z \in [0, H], \quad \bar{u}|_{z=0} = 0, \quad \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}|_{z=H} = 0, \quad \bar{u}|_{t=0} = u_0(z).$$

По аналогии с моделью Пламба в некоторой области $z \in [h_f, H]$ внешнее воздействие задавалось как $f(z, t) = u_f \frac{2\pi}{T_f} \cos(\frac{2\pi}{T_f} t)$. Результаты численных экспериментов с моделью (2.8) показали, что характеристики колебаний в ней сильно чувствительны как

к вариациям параметров модели, так и к внешним ПГК. Процессы взаимодействия с внешними циклами сводятся или к разрушению собственных колебаний модели (2.8) внешними колебаниями, или к явлениям точного захвата частоты внешнего воздействия.

На рис. 4 показан профиль собственных колебаний в модели (2.8) без внешнего воздействия и профиль колебаний при тех же параметрах модели с внешним воздействием в некоторой области, имитирующем реалистичные ПГК. При этом нижняя граница ПГК задавалась на реалистичной высоте $h_f = 50$ км. Параметры модели взяты так, что собственный период колебаний на высоте 50 км $T_0 = 22.4$ мес.

На рис. 4б видна вполне определенная синхронизация фаз и периодов, перераспределение периодов происходит в широкой высотной области, при этом каждая фаза собственных колебаний подстраивается под кратное число фаз ПГК. Отметим, что, несмотря на эти скачки, средний период колебаний на высоте ниже 50 км сохранился.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ДАННЫХ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В соответствии с методами, изложенными в первом параграфе, приведем результаты расчета спектральных характеристик КДК по данным реанализов наблюдений ERA40 и NCEP/NCAR и данным модели ОЦА ИВМ РАН $2^\circ \times 2.5^\circ \times 80$. Основной задачей является выявление основных особенностей формирования и изменчивости периода КДК и их возможной синхронизации с ПГК и сезонным циклом.

На рис. 5 приведены результаты спектрального анализа зональной скорости на экваторе по данным наблюдений и моделирования. В целом реанализы данных наблюдений NCEP/NCAR и ERA40 демонстрируют согласие в спектральных характеристиках экваториальной динамики. Наиболее сильные спектральные пики наблюдаются в области стратосферы со значением периода ~ 28 –29 месяцев (КДК), а также в районе стратопазы и мезосферы, соответствующие ПГК и годовому циклу (по данным ERA40). Отметим также присутствие относительно слабого годового цикла на уровне тропопазы и в верхней стратосфере. Для КДК в целом анализ показывает широкий спектральный максимум в области от двух до трех лет, характеризующих изменчивость периода КДК, при этом имеется побочный пик в области 23–25 мес, что может свидетельствовать в пользу явления синхронизации четырех ПГК (или двух годовых циклов) и КДК. Выделяется ряд нерегулярных достаточно слабых пиков, некоторые из которых наиболее сильно проявляются в районе стратопазы, в переходной области между КДК и

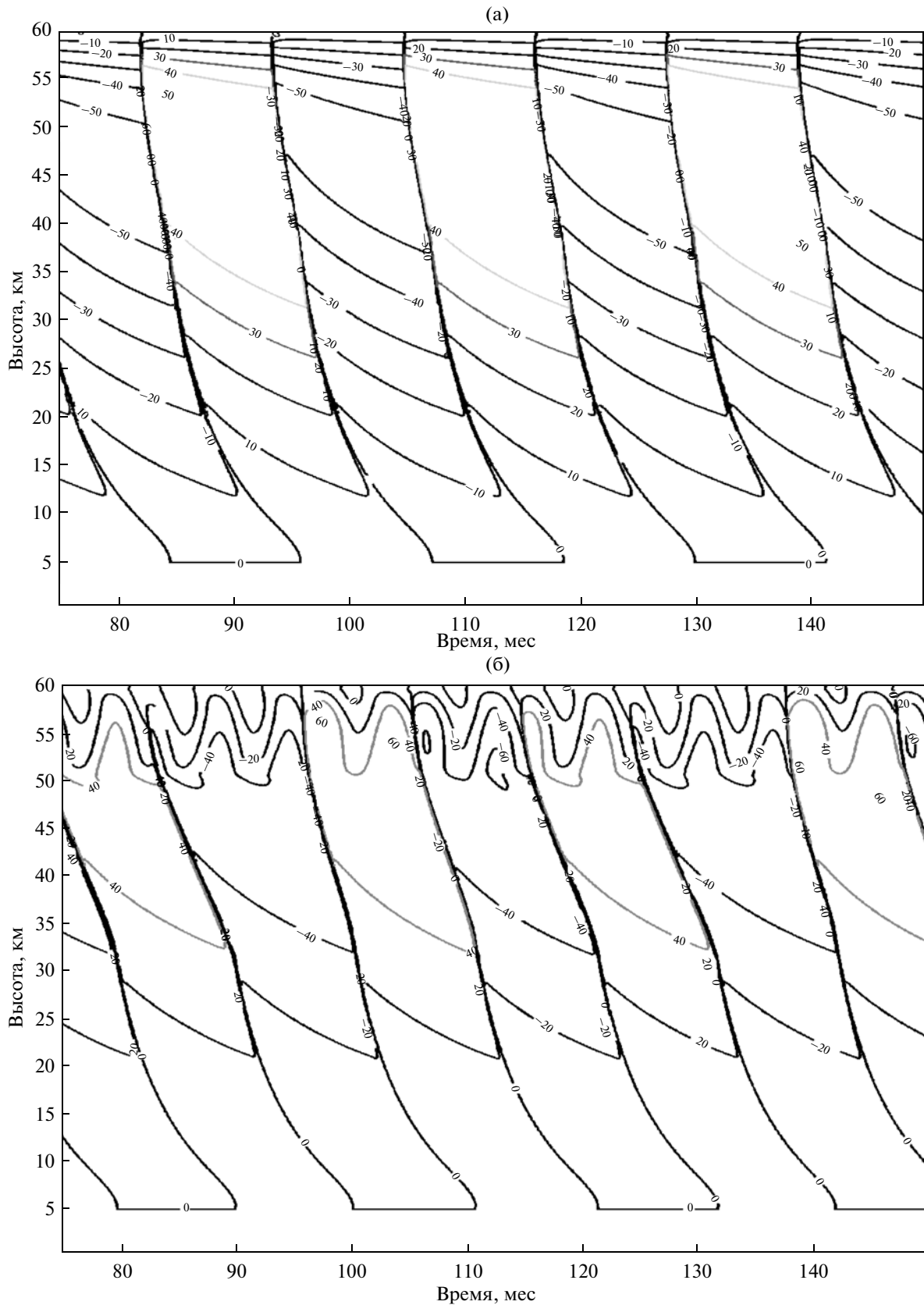


Рис. 4. Профиль зональной скорости, полученный численным решением модели обрушения коротких волн без (а) и с периодическим внешним воздействием (б) со значениями амплитуды и периода: $u_f = 20$ м/с, $T_f = 6$ мес и высотой нижней границы $h_f = 50$ км. Величина скорости приведена в м/с, изолинии проведены с интервалом 10 м/с, темным выделены зоны западного ветра (отрицательное направление).

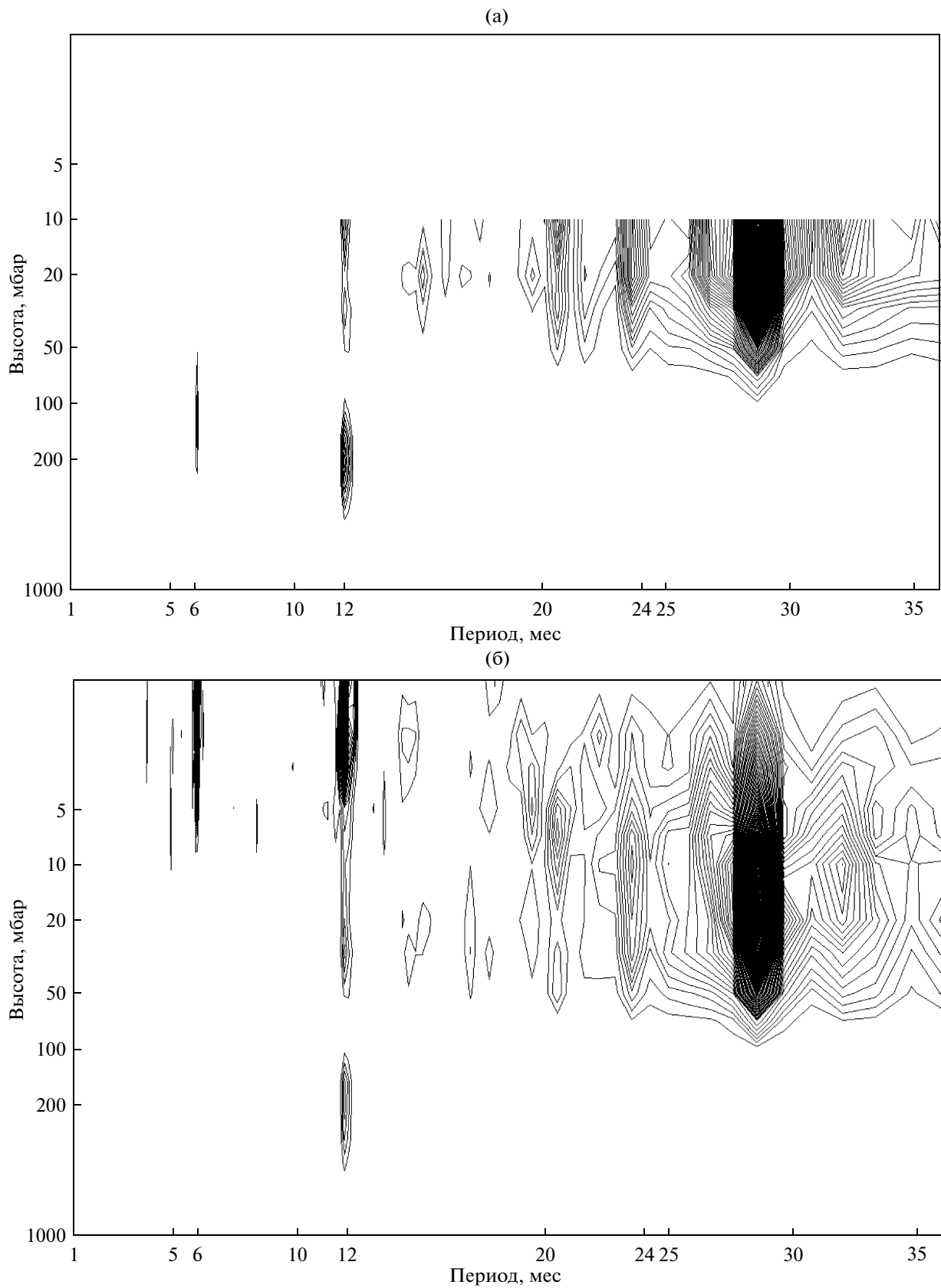


Рис. 5. Спектр зонального ветра на экваторе по периодам по данным реанализов наблюдений NCEP/NCAR (а), за время 1956–2004 гг. и ERA40 (б) за время 1977–2001 гг., а также по данным численного эксперимента с моделью ОЦА ИВМ РАН (в) за 100 лет. Высотная область 1000–1 мбар. Изолинии проведены в относительных единицах.

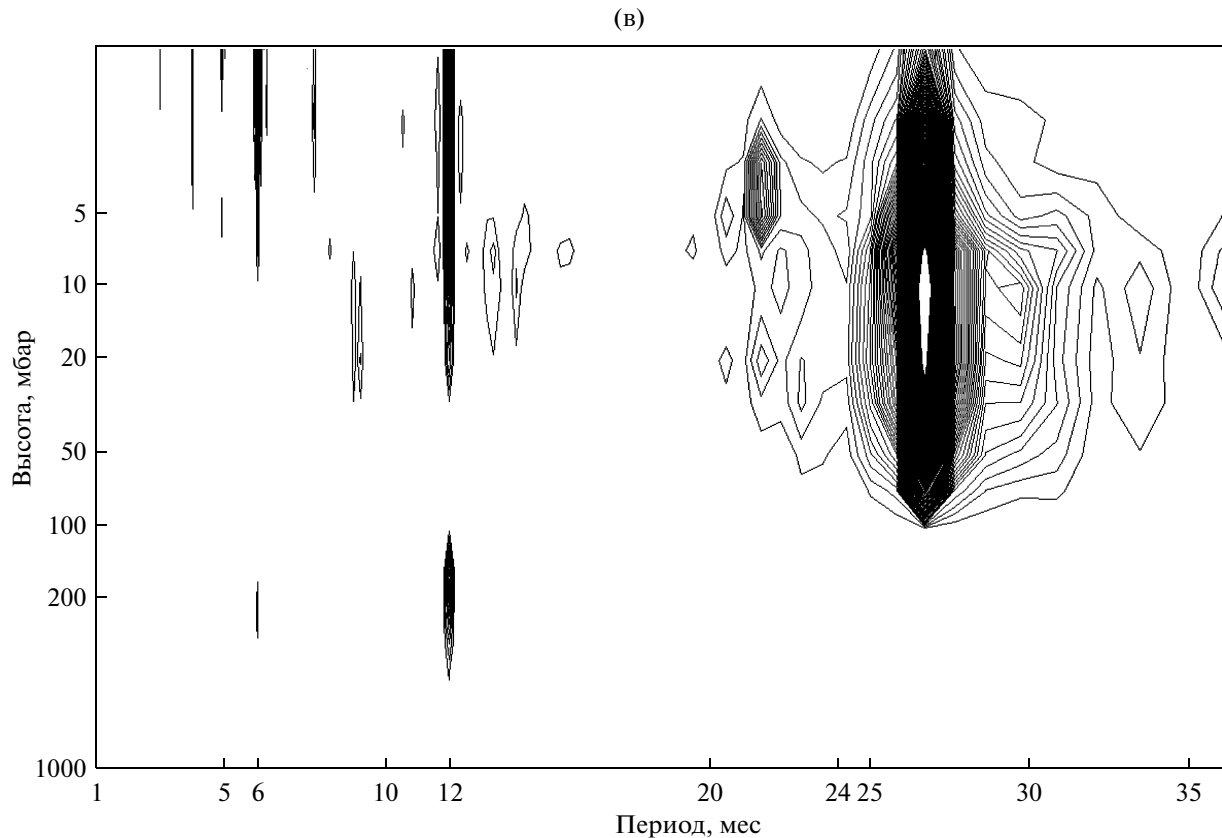


Рис. 5. Продолжение.

ПГК. Эти побочные гармоники значительно меньше основного пика, приходящегося на средний период КДК, с другой стороны, их также можно трактовать как взаимодействия ПГК, сезонного цикла и КДК. Как и по результатам спектрального анализа данных наблюдений, по данным численного моделирования получены сильные пики, соответствующие ПГК и сезонному циклу в мезосфере и на уровне стратосферы и широкий спектральный пик КДК с максимумом при $T \sim 28$ мес, при этом есть слабые побочные пики при $T \sim 33$ мес и $T \sim 22$ мес.

Результаты анализа спектральных характеристик КДК по данным моделирования можно признать близкими к наблюдениям, хотя стоит отметить, что разброс периода КДК уже, чем по данным наблюдений. Отметим, что отсутствие явных спектральных максимумов в областях 24 и 30 мес не говорит в пользу гипотезы о полной синхронизации ПГК и КДК. Однако в целом по спектральным характеристикам трудно делать однозначные выводы о процессах синхронизации. Методы спектрального анализа позволяют выделить основные колебания зонального ветра на экваторе: как мы отмечали выше, это КДК, годовой цикл, который присутствует и в верхней стратосфере и мезосфере, и сильные полугодовые колебания в мезосфере.

Для дальнейшего анализа спектральных распределений в таблице приводятся средние значения и среднеквадратичные отклонения периодов, рассчитанных как разница между переходами зональной скорости через ноль от восточного к западному направлению (T_0^w в соответствии с обозначениями первого параграфа), а также длительности западной и восточной фаз КДК (рассчитанные интервалом между переходами через ноль от западной к восточной фазе и наоборот).

Как видно из таблицы, на высотах ~ 50 – 15 мбар средний период одинаков – порядка 28 мес, при этом продолжительность фаз КДК различна в нижней и верхней стратосфере (что хорошо видно на рис. 1), что может говорить о действии различных типов волн на разных высотах. Роль сезонного и полугодового цикла не проявляется в средних значениях, их влияние возможно в переходных от КДК к ПГК областях ~ 10 – 5 мбар, где изменчивость периода усиливается. В численном эксперименте средний период в целом чуть ниже, чем по реальным данным, однако разброс значений меньше. При этом длительность западной и восточной фаз в целом соответствуют данным реанализов и их несимметричность соблюдена.

Средние значения характеристик КДК по данным реанализов NCEP и ERA40 и численного эксперимента с моделью ОЦА ИВМ РАН

NCEP/NCAR реанализ				
Высота	50 мбар	20 мбар	10 мбар	5 мбар
Средний период	28 мес	28 мес	27.9 мес	—
Среднеквадратичное отклонение значений периода	4.2 мес	3.5 мес	3.8 мес	—
Длительность западной фазы	14.6 мес	11.8 мес	13.4 мес	—
Длительность восточной фазы	13.4 мес	16.2 мес	14.5 мес	—
ERA40 реанализ				
Высота	50 мбар	20 мбар	10 мбар	5 мбар
Средний период	28.6 мес	27.8 мес	28.3 мес	12.7 мес
Среднеквадратичное отклонение значений периода	4.7 мес	4.9 мес	4.3 мес	8.2 мес
Длительность западной фазы	16.8 мес	14.2 мес	14.4 мес	6.6 мес
Длительность восточной фазы	11.6 мес	14.2 мес	13.9 мес	5.9 мес
Модель ОЦА ИВМ РАН				
Высота	50 мбар	20 мбар	10 мбар	5 мбар
Средний период	26.7 мес	26.7 мес	26.7 мес	19.9 мес
Среднеквадратичное отклонение значений периода	2.6 мес	2.4 мес	2.9 мес	7.6 мес
Длительность западной фазы	13.1 мес	10.9 мес	5.8 мес	11.7 мес
Длительность восточной фазы	13.6 мес	11.5 мес	15.2 мес	8.6 мес

Для более детального анализа возможной синхронизации КДК и ПГК приведем на рис. 6 гистограммы распределения периодов колебаний зонального ветра на экваторе по данным обоих реанализов наблюдений, а также модели ОЦА ИВМ РАН на различных высотах. Период колебаний для данных гистограмм определялся разницей между переходами зональной скорости через ноль от восточного к западному направлению (T_0^w в соответствии с обозначениями §1). Из представленных гистограмм видно, что существенных отличий в отображении КДК между реанализами NCEP/NCAR и ERA40 не наблюдается. Для высот 50 и 20 мбар гистограммы близки, распределения периодов колебаний имеют ряд нерегулярно расположенных побочных пиков, нет явных пиков на величинах, кратных полугоду. В этой области высот распределение периодов в модели близко к нормальному (ближе, чем по данным реанализов).

Для высоты 10 мбар распределения NCEP/NCAR и ERA40, безусловно, отличаются, но пики наблю-

даются на величинах, кратных ПГК. Для данных численного моделирования на этой высоте распределение периодов близко к распределениям на нижних уровнях, однако пик расположен ближе к величине 24 мес, появляются периоды порядка 6 мес. На высоте 5 мбар картина существенно меняется — как по данным реанализов, так и по данным модели: в эволюции зональной скорости доминируют ПГК, периоды которых распределены достаточно неравномерно, наблюдаются сильные пики на величинах 6, 12 и 24 мес. Такая неравномерная картина, возможно, возникает при наложении ПГК, КДК и годового хода в эволюции зональной скорости. Высоту 5 мбар можно считать нижней границей ПГК, при этом КДК в спектре на этой высоте наблюдаются. В целом картина распределения периодов на высотах 10–5 мбар говорит о возможной синхронизации ПГК и КДК. Эту область, как в расчетах по данным моделирования, так и в расчетах по данным наблюдений можно считать переходной между ПГК и КДК. В ней происходят основные процессы синхронизации, что соответствует результатам, полу-

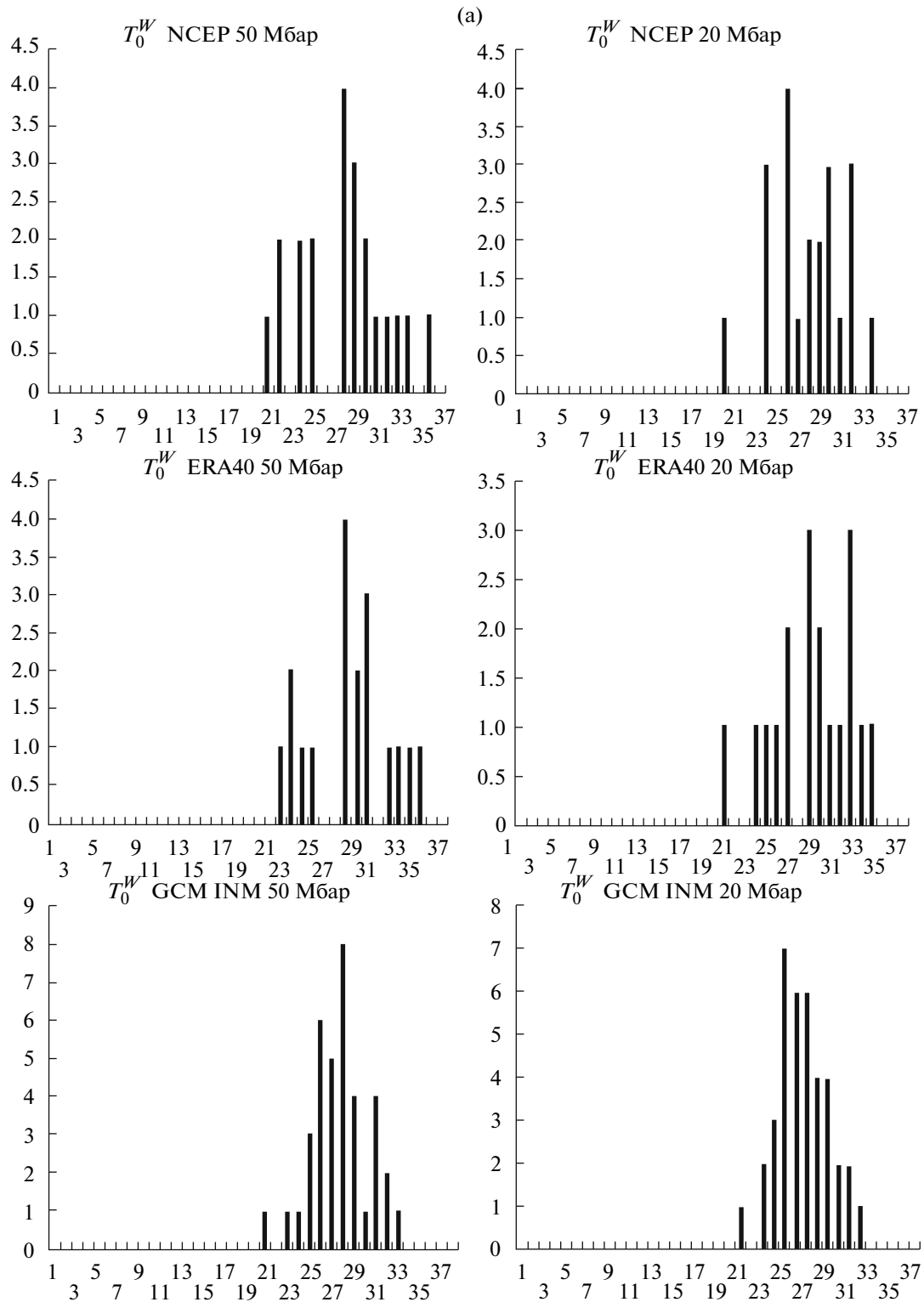


Рис. 6. Гистограммы распределения периодов КДК зонального ветра на экваторе по данным реанализов наблюдений NCEP/NCAR, ERA40 и модели ОЦА ИВМ РАН для p -уровней 50 (слева) и 20 (справа) мбар (а), 10 (слева) и 5 (справа) мбар (б). Периоды рассчитывались, как интервал между ближайшими переходами через ноль от восточного к западному ветру в фильтрованном ряде данных. По оси абсцисс отложены возможные величины периода (мес), по оси ординат — количество встречающихся по ряду данных значений.

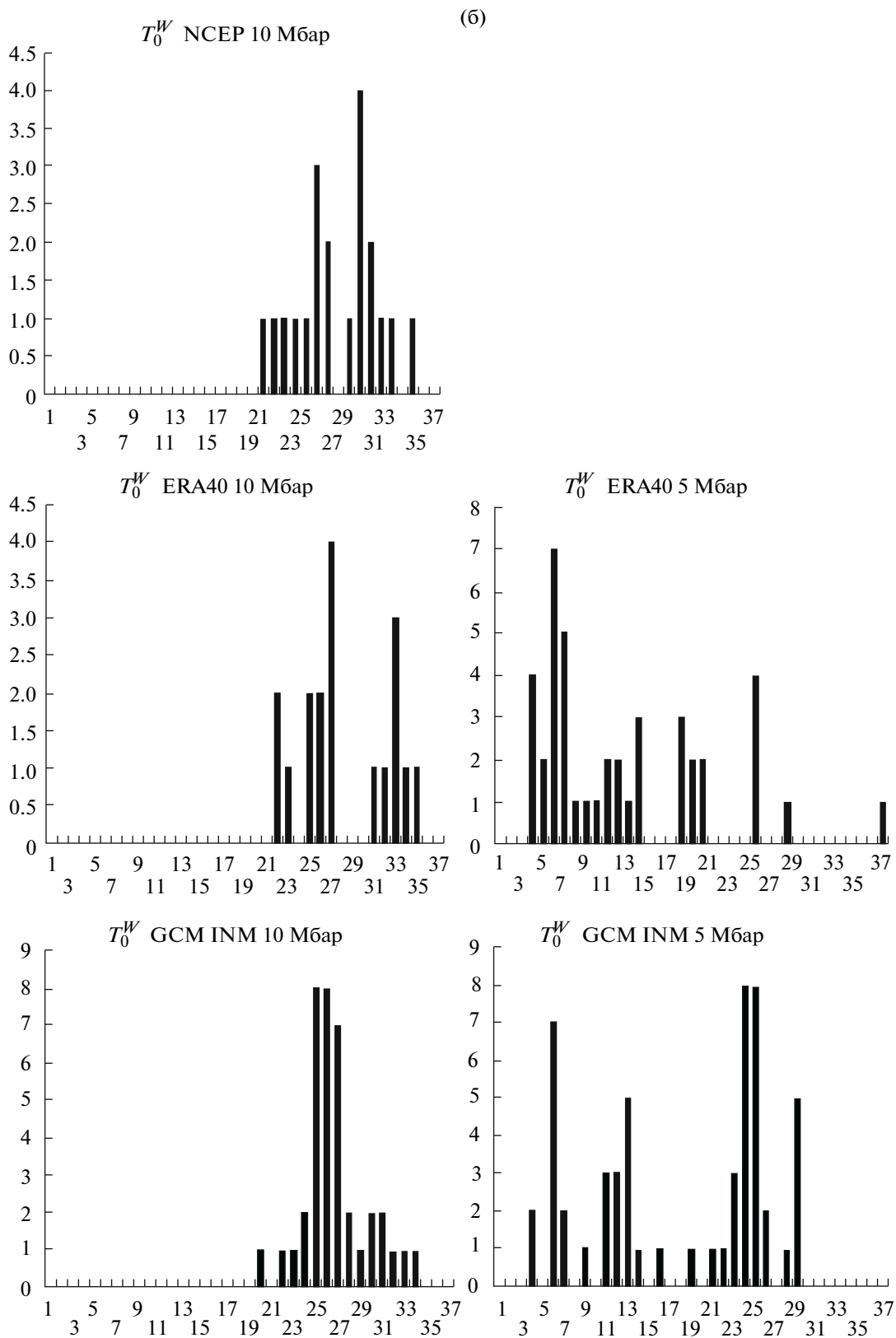


Рис. 6. Продолжение

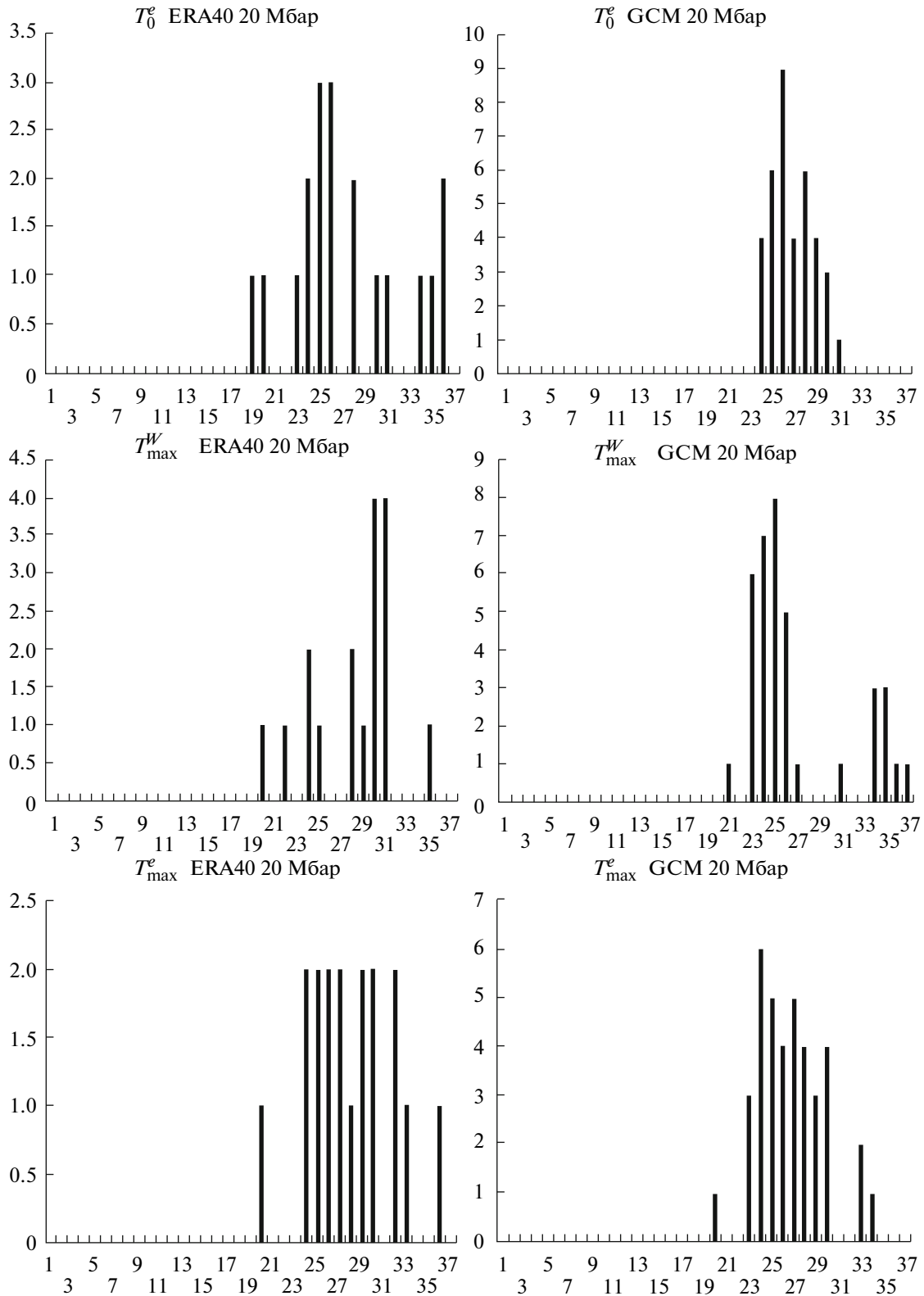


Рис. 7. Гистограммы распределения периодов КДК зонального ветра на экваторе по данным реанализов наблюдений ERA40 (справа) и модели ОЦА ИВМ РАН (слева) для p -уровня 20 мбар. По оси абсцисс отложены возможные величины периода (месяцы), по оси ординат – количество встречающихся по ряду данных значений.

ченным в §2. Следует отметить, что в модели ОЦА КДК в этой области несколько сильнее, чем по наблюдениям.

Существенных отличий в гистограммах характеристик КДК с фильтрованным годовым циклом (T_0^w и T_0^e) и без фильтрации нет (T_0^{w*} и T_0^{e*}). Как сказано выше, для удобства сравнения с другими работами основные результаты мы приводим для фильтрованного ряда.

Существенно другие результаты мы получаем при расчете периодов по разнице наступления максимумов (T_{\max}^w и T_{\max}^e) и по переходам через ноль от западного к восточному направлению (T_0^e). Для этих способов расчета на рис. 7 приведены гистограммы распределения периодов КДК для данных ERA40 и модели на высоте 20 мбар. Результаты расчетов по данным реанализа NCEP/NCAR близки к результатам расчетов по данным ERA40, однако для них синхронизация в нижней стратосфере выражена слабее. При расчете периода по разнице западных максимумов (T_{\max}^w) наблюдаются пики на величинах, кратных ПГК (24, 30 и 36 мес), подобный результат наблюдается на всех высотах распространения КДК. Этот факт говорит в пользу гипотезы работы [17] о синхронизации КДК и ПГК и проникновении влияния ПГК в стратосферу, связанной с регулированием начала западной фазы КДК. Для всех высот при расчете периода по разнице западных максимумов синхронизация к кратным периодам ПГК наблюдается и в расчетах по данным численного моделирования. Отметим, что при расчете периода по разнице восточных максимумов (T_{\max}^e) распределения близки к равномерным как для наблюдений, так и для модели. Синхронизация КДК и ПГК для данных обоих реанализов наблюдений на всех высотах наблюдается и при расчете периода как разницы переходов через ноль от западного к восточному ветру (T_0^e), в отличие от T_0^w (сравнить с рис. 6), однако этот эффект не реализуется в модели. Подобные результаты могут говорить о первичной роли синхронизации по западным максимумам во всей области КДК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сформулируем основные результаты данной работы.

Анализ данных наблюдений и моделирования показывает, что определенная синхронизация КДК и ПГК (а возможно, и годового цикла) имеет место. Простые аналитические оценки и численные эксперименты с малопараметрическими моделями показывают наличие сильной синхронизации в верхних слоях в области перехода между КДК и ПГК и слабой синхронизации в нижних слоях области распространения КДК (синхронизация фаз и возможное

локальное смещение периодов в стороны ближайших кратных ПГК).

Спектральный анализ и гистограммы показывают, что в данных наблюдений и моделирования процесс синхронизации к кратным периодам ПГК идентифицируется в области перехода между КДК и ПГК. Для всех рассматриваемых высот синхронизация КДК с кратными ПГК идентифицируется по разностям западных максимумов как по данным наблюдений, так и по данным численного моделирования. Аналогичная синхронизация имеет место и по разнице переходов через ноль от западной к восточной фазе КДК только по данным наблюдений. При расчете периода другими способами синхронизация КДК и ПГК в распределении периодов в средней и нижней стратосфере слабо выражена.

То, что расчет периодов по интервалу между максимумами зональной скорости дает значительно большие основания говорить о синхронизации, вполне объяснимо на примере простой модели, использованной нами для оценки периода КДК в §2. Положим, что мы имеем сдвиг скорости на величину $A \sin(\omega t)$. Очевидно, что интеграл от $\sin(\omega t)$ по периоду T будет меняться не существенно, если $T \gg \frac{2\pi}{\omega}$, в то же время расстояние между ближайшими максимумами будет равно $k \frac{2\pi}{\omega}$, где k – целое число.

Модель ОЦА ИВМ РАН в целом удовлетворительно воспроизводит основные спектральные характеристики КДК и ПГК и особенности изменчивости периода КДК, наблюдаемые по данным реанализов NCEP/NCAR и ERA40. Сравнение характеристик КДК по данным этих реанализов показывает близкие спектры зональной скорости в экваториальной атмосфере и сходные гистограммы.

Результаты исследования процессов синхронизации и изменчивости периода КДК с помощью аналитических оценок и численного моделирования на основе малопараметрических моделей в целом согласуются с результатами работы [2]: собственный период КДК определяется длинными планетарными волнами и формируется в нижних слоях стратосферы, однако в верхних слоях важным становится процесс обрушения гравитационных волн. Оба механизма показывают возможность синхронизации с ПГК или годовым циклом в верхних слоях, при этом процессе роль коротких волн представляется более значимой.

Отметим, что параметризация коротких гравитационных волн в модели ОЦА ИВМ РАН важна для воспроизведения как КДК, так и ПГК. В численном эксперименте при отсутствии гравитационно-волнового сопротивления в экваториальной динамике сохраняется лишь слабый годовой цикл в верхних слоях атмосферы.

Таким образом, формирование КДК от разных типов волн вместе с ПГК и годовым циклом можно рассматривать как единую систему колебаний в циркуляции экваториальной верхней атмосферы. Мы отмечали, что для адекватного воспроизведения КДК и ПГК (в смысле близости к данным наблюдений) очень важен выбор параметризации вертикальной диффузии (см. также [2]). Численные эксперименты с моделью ОЦА показали, что при вариации значений этого параметра мы можем получать различные периоды КДК от 12 до 36 мес, при этом в точке резонанса с двухлетним циклом (где собственный период КДК при выбранном параметре диффузии равен 24 мес) мы получили переброс периода от 12 к 24 мес через 25 лет счета. Детальному исследованию этих процессов будет посвящена отдельная работа.

Авторы благодарят администрацию МФТИ за предоставленную возможность использования кластера МФТИ-60 для расчетов модели ОЦА. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 08-05-00485-а, и поддержке гранта № 3684 программы “Научный потенциал высшей школы”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baldwin M.P. et al. The Quasi-Biennial Oscillation // *Rev. Geophys.* 2001. V. 39. № 2. P. 179–229.
2. Кулямин Д.В., Володин Е.М., Дымников В.П. Моделирование квазидвухлетних колебаний зонального ветра в экваториальной стратосфере. Часть I. Малопараметрические модели // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2008. Т. 44. № 1. С. 5–20.
3. Кулямин Д.В., Володин Е.М., Дымников В.П. Моделирование квазидвухлетних колебаний зонального ветра в экваториальной стратосфере. Часть II. Модели общей циркуляции атмосферы // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2009. Т. 45. № 1. С. 43–61.
4. Dunkerton T.J. The role of gravity waves in the quasibiennial oscillation // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. № D22. P. 26053–26076.
5. Гледзер Е.Б., Обухов А.М. Квазидвухлетняя цикличность как параметрическое явление в климатической системе // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1982. Т. 18. № 11. С. 1154–1158.
6. Груздев А.Н., Безверхний В.А. Многолетние вариации квазидвухлетней цикличности экваториального стратосферного ветра // *Изв. АН. Физика атмосферы и океана.* 1999. Т. 35. № 6. С. 773–785.
7. Pascoe C.L. et al. The quasi-biennial oscillation: Analysis using ERA-40 data // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. № D08105. doi: 10.1029/2004JD004941.
8. Fischer P., Tung K.K. A reexamination of the QBO period modulation by the solar cycle // *J. Geophys. Res.-Atmos.* 2008. V. 113. № D07114. doi: 10.1029/2007JD008983.
9. Mayr H.G., Mengel J.G., Wolff C.L. et al. QBO as potential amplifier of solar cycle influence // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. № L05812. doi: 10.1029/2005GL025650.
10. Шефов Н.Н., Семенов А.И. Спектральный состав циклических аperiодических (квазидвухлетних) вариаций солнечной активности и земной атмосферы // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2006. Т. 46. № 4. С. 435–441.
11. Dunkerton T.J. Annual variation of deseasonalized mean flow acceleration in the equatorial lower stratosphere // *J. Meteor. Soc. Japan.* 1990. V. 68. № 4. P. 499–508.
12. Salby M., Callaghan P. Connection between the solar cycle and the QBO: The missing link // *J. Climate.* 2000. V. 13. № 4. P. 2652–2662.
13. Soukharev B.E., Hood L.L. Possible solar modulation of the equatorial quasibiennial oscillation: Additional statistical evidence // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. № D14. P. 14855–14868.
14. Hamilton K. On the quasi-decadal modulation of the stratospheric QBO period // *J. Climate.* 2002. V. 15. № 17. P. 2562–2565.
15. Holton J.R., Lindzen R.S. An updated theory for the quasi-biennial cycle of the tropical stratosphere // *J. Atmos. Sci.* 1972. V. 29. № 6. P. 1076–1080.
16. Gray L.J., Pyle J.A. A Two-Dimensional Model of the Quasi-Biennial Oscillation of Ozone // *J. Atmos. Sci.* 1989. V. 46. № 2. P. 203–220.
17. Kuai L., Shia R.L., Jiang X., Tung K.K., Yung Y.L. Nonstationary Synchronization of Equatorial QBO with SAO in Observations and a Model // *J. Atmos. Sci.* 2009. V. 66. № 6. P. 1654–1664.
18. Sassi F., Garcia R.R. The role of equatorial waves forced by convection in the tropical semiannual oscillation // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 54. № 15. P. 1925–1942.
19. Kalnay E., Jenne R. Summary of the NMC/NCAR reanalysis workshop of April 1991 // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1991. V. 72. № 12. P. 1897–1904.
20. Kalnay E. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1996. V. 77. № 3. P. 437–471.
21. Uppala S.M. et al. The ERA-40 re-analysis // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 2005. V. 131. № 612. P. 2961–3012.
22. Pawson S., Fiorino M. A comparison of reanalyses in the tropical stratosphere. Pt 2: the quasi-biennial oscillation // *Climate Dynamics.* 1998. V. 14. № 9. P. 645–658.
23. Baldwin M.P., Gray L.J. Tropical stratospheric zonal winds in ECMWF ERA-40 reanalysis, rocketsonde data, and rawinsonde data // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. № L09806. doi: 10.1029/2004GL022328.
24. Hines C.O. Doppler spread parameterization of gravity wave momentum deposition in the middle atmosphere. Pt 1, Basic formulation // *J. Atm. Terr. Phys.* 1997. V. 59. № 4. P. 371–386.
25. Plumb R.A. The Interaction of two internal waves with the mean flow: implications for the theory of the quasi-biennial oscillation // *J. Atmos. Sci.* 1977. V. 34. № 12. P. 1847–1858.

Spectral Characteristics of Quasi-Biennial Oscillations of the Equatorial Stratospheric Wind and the Problem of Synchronization

D. V. Kulyamin and V. P. Dymnikov

Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, ul. Gubkina 8, Moscow, 119991 Russia

e-mail: kulyamin@mail.ru; dymnikov@inm.ras.ru

Received October 16, 2009; in final form, December 2, 2009

Abstract—Spectral characteristics of the quasi-biennial oscillations (QBO) of the zonal velocity in the equatorial stratosphere are investigated in this work on the basis of data from the NCEP/NCAR and ERA40 reanalyses and numerical experiments with the atmospheric general circulation (AGC) model developed at the Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences (INM RAS). The problem of synchronizing QBO and semiannual oscillations (SAO) of the zonal velocity in the mesosphere is considered. It is shown that the process of synchronization to multiples of SAO periods is identifiable in the transition region between QBO and SAO. For all heights where QBOs exist, their synchronization with SAOs is expressed in the calculation of the period in terms of differences between the westerly maxima. The INM RAS AGC model is shown to satisfactorily reproduce the main spectral characteristics of QBO and SAO, as well as specific features of the variability of the QBO period obtained from reanalysis data. The possibility of synchronization with SAO or the annual cycle in the upper layers is shown on the basis of an investigation of QBO models with a small number of parameters, both for the absorption mechanism of planetary waves by the mean flow and for the breaking of short gravity waves. The QBO formation from different wave types, together with SAO and the annual cycle, can be considered a unified system of oscillations in the circulation of the equatorial upper atmosphere.