

*На правах рукописи*

**Кулямин Дмитрий Вячеславович**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАЗИДВУХЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЙ ЗОНАЛЬНОГО  
ВЕТРА В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ СТРАТОСФЕРЕ**

25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

**Москва 2010**

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Московский физико-технический институт (государственный университет)"

**Научный руководитель:**

академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор  
Дымников Валентин Павлович

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук  
Груздев Александр Николаевич  
кандидат физико-математических наук  
Варгин Павел Николаевич

**Ведущая организация:**

Институт вычислительной математики и математической геофизики  
Сибирского отделения РАН

Защита состоится «24» сентября 2010 года в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.045.01 в Учреждении Российской Академии наук Институте вычислительной математики РАН по адресу: 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 8.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской Академии наук Института вычислительной математики РАН.

Автореферат разослан «23» августа 2010 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.045.01

доктор физико-математических наук

Бочаров Г.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Проблема изменений климата стала в последние десятилетия одной из центральных задач, возникающих перед человечеством. Эта задача имеет свои специфические особенности, следствием которых является то, что главным методом исследования возможных причин изменений климата является численное моделирование, основу которого составляют глобальные климатические модели. Считается, что главным направлением в решении этой проблемы является построение климатических моделей, всё более точно воспроизводящих современный климат.

Совершенствование современных климатических моделей идёт одновременно в разных направлениях. Первое направление связано с увеличением пространственного разрешения (в первую очередь, горизонтального) с целью более адекватного воспроизведения региональных климатических особенностей. Второе направление связано с включением в модели описания новых физических процессов. В качестве примера можно рассмотреть так называемые Северо-атлантические колебания (САК) или связанные с ними Арктические Осцилляции (АО). В последние годы было показано, что существенный вклад в их изменчивость может приносить сигнал, идущий из стратосферы, поскольку АО и циркумполярный стратосферный вихрь образуют единую систему. Третье направление ориентировано на переработку климатических моделей в модели Земной системы с включением описания переноса и трансформации малых газовых примесей, углеродного и метанного циклов, динамики растительности и т.п. Создание модели тропосферы-стратосферы-мезосферы представляет собой чрезвычайно сложную проблему. Она сложна во всех отношениях: и с точки зрения физической постановки задачи, и с точки зрения формулирования методов решения исходных систем уравнений, и с точки зрения реализации её на современных параллельных вычислительных системах.

Общая проблема, с решением которой связана работа, есть проблема адекватного воспроизведения современного климата с помощью глобальных климатических моделей. В основе воспроизведения современного климата глобальными климатическими моделями лежит исследование механизмов формирования ключевых физических процессов.

Исходя из всего вышеизложенного, на данный момент одна из наиболее актуальных проблем моделирования климата - это создание модели общей циркуляции атмосферы (ОЦА), реализующей важные с точки зрения описания верхних слоёв атмосферы физические процессы типа квазидвухлетних колебаний (КДК) экваториального ветра в стратосфере. Отметим, что воспроизведение КДК в стратосфере является важным условием также и воспроизведения взаимодействия аномалий солнечной активности с динамикой атмосферы.

Это глобальное климатическое явление может быть описано как медленно распространяющиеся вниз западная и восточная фазы зонального ветра, сменяющие друг друга с периодом около 28 месяцев (такие колебания непосредственно наблюдаются в экваториальной зоне на высотах примерно 16-50 км). Имеются многочисленные сведения о воздействии КДК на глобальные климатические характеристики. Основной предполагаемый механизм воздействия КДК на динамику атмосферы связан с модуляцией

переноса волновой активности во внетропической стратосфере (в основном переноса стационарными волнами). Эта модуляция может стимулировать внезапные стратосферные потепления. Модуляцией осуществляется также взаимодействие КДК с другими низкочастотными процессами типа Эль-Ниньо и Арктических осцилляций. Поскольку КДК зонального ветра непосредственно связаны с аналогичными колебаниями температуры, то влияние КДК на генерацию озона в тропической стратосфере и его перенос к полюсам (через модуляцию динамических процессов в стратосфере) также представляется закономерным. Аналогичные тенденции обнаружены в процессах переноса других атмосферных примесей, образующихся в результате различных антропогенных воздействий или вулканической активности. Важной также представляется и связь КДК с углеродным циклом в атмосфере.

Несмотря на всю значимость КДК лишь немногие климатические модели в настоящее время способны воспроизводить это явление.

### **Цель работы**

Основной целью данной работы является решение проблемы воспроизведения моделями ОЦА КДК зонального ветра в экваториальной стратосфере. В работе рассматриваются следующие задачи.

1. Исследование механизмов формирования КДК от волн разных масштабов на простых малопараметрических моделях.
2. Выработка условий реализации КДК в моделях ОЦА.
3. Построение модели ОЦА, адекватно воспроизводящей КДК и земной климат в целом.
4. Изучение основных характеристик КДК по данным наблюдений и моделирования. Исследование проблемы формирования основных характеристик КДК и их устойчивости.
5. Исследования влияния внешних колебательных процессов (полугодового и годового циклов) на формирование КДК.

### **Научная новизна**

Разработанные в ходе исследования модели и методики являются новыми. Предложена методика исследования механизмов формирования КДК на основе малопараметрических моделей. Предложены новые методы аналитических оценок характеристик КДК для малопараметрических моделей. Предложены и использованы методы спектрального анализа и построения гистограмм для исследования характеристик КДК в моделях ОЦА.

1. Впервые показано, что малопараметрическая модель на основе параметризации обрушения коротких волн воспроизводит КДК с реалистичными характеристиками.
2. Построена и исследована новая совместная малопараметрическая модель, воспроизводящая КДК, объединяющая взаимодействие длинных волн со средним течением (на основе модели Пламба) и обрушение коротких волн (на основе параметризации, предложенной Хайнсом).
3. Построена новая версия модели ОЦА ИВМ РАН с высоким вертикальным разрешением, исследовано воспроизведение климата этой моделью.
4. В новой версии модели ОЦА ИВМ РАН получены реалистичные КДК.
5. Впервые получены подробные результаты исследования спектральных характеристик КДК, как по данным наблюдений, так и моделирования.

### **Положения и результаты работы, выносимые на защиту**

1. Результаты исследования малопараметрической модели формирования КДК через механизм взаимодействия длинных волн со средним потоком. Экспериментальные и аналитические оценки зависимости характеристик КДК от параметров этой модели, результаты исследования структурной устойчивости КДК.
2. Построение и исследование малопараметрической модели формирования КДК через механизм обрушения гравитационных волн. Результаты численных экспериментов по изучению зависимости основных характеристик КДК от параметров модели.
3. Построение и результаты исследования совместной модели формирования КДК от обоих механизмов.
4. Построение и исследование новой версии модели ОЦА ИВМ РАН с высоким пространственным разрешением.
5. Воспроизведение реалистичных КДК в новой версии модели ОЦА ИВМ РАН.
6. Результаты исследования спектральных характеристик КДК и проблемы синхронизации КДК и полугодовыми колебаниями (ПГК).

### **Практическая и научная значимость работы**

Как показано выше, все поставленные задачи являются значимыми для современного моделирования климата. Результаты исследования механизмов формирования КДК улучшают понимание процессов, ответственных за основные характеристики этого явления. По этим результатам получены условия, необходимые для реализации КДК в моделях ОЦА.

Построенная новая версия модели ОЦА ИВМ РАН, воспроизводящая КДК, является следующим шагом в развитии моделей ОЦА. Воспроизведение КДК с характеристиками, близкими к наблюдаемым, позволяет наиболее точно моделировать динамику в верхней и средней атмосфере.

Полученные результаты исследования проблемы синхронизации позволяют рассматривать циркуляцию экваториальной верхней атмосферы как единую систему колебаний, включающую КДК и ПГК.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и семинарах:

- Международная конференция "Математические методы в геофизике" ММГ (Новосибирск, 2008 г.)
- Международный симпозиум стран СНГ «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД 2009) (Санкт-Петербург, 22-26 июня 2009 г.)
- 50, 51, 52 научные конференции МФТИ (2007 г., 2008 г., 2009 г.)
- Отчетная конференция по программе 14 президиума РАН (Пушино, 2009 г.)
- Конференция по актуальным проблемам метеорологии, посвященным 90-летию Петросянца М.А. (МГУ, Москва, 2009 г.)
- Доклады на семинарах и отчетных сессиях ИВМ РАН (Москва, 2007 г., 2008 г., 2009 г.)

## **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано и сдано в печать 5 научных работ, в том числе 4 из списка изданий, рекомендованного ВАК РФ. Список приведен в конце автореферата.

## **Личный вклад автора**

В публикациях вклад диссертанта наравне с соавторами работ.

## **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы. Принята сквозная нумерация рисунков, литературных ссылок и алфавитный библиографический список. Диссертация содержит 79 страниц текста (без включения таблиц и рисунков), 52 рисунка и 1 таблицу. Список цитируемой литературы содержит 45 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Введение**

Во введении обоснована актуальность темы исследования, показано современное состояние проблемы, рассматриваются базовые подходы к моделированию КДК, описываются механизмы их формирования. Введение дает характеристику основных проблем и задач, возникающих при этом.

### **Глава 1**

Первая глава посвящена моделированию КДК на основе малопараметрических моделей и содержит 5 разделов.

Как отмечено выше, немногие современные модели ОЦА способны воспроизводить КДК. Идеальный вариант глобальной модели ОЦА должен отражать взаимодействие всего спектра экваториальных волн с зональным ветром в стратосфере. До сих пор неясно, каким необходимым и достаточным условиям должна удовлетворять модель, чтобы КДК воспроизводились. Именно эта задача являлась главной целью настоящей главы.

Основная трудность в решении этой проблемы содержится в реализации достаточно сложного механизма формирования КДК: в основе лежит нелинейное взаимодействие зонального потока и вертикально распространяющихся экваториальных волн. Основным носителем этого взаимодействия могут быть планетарные экваториальные волны, однако было установлено, что энергии этих волн явно недостаточно и необходимо рассматривать весь спектр экваториальных волн вплоть до самых коротких гравитационных. В основе механизма взаимодействия планетарных волн со средним потоком лежит поглощение волн вблизи критических уровней, где фазовая скорость волны равна скорости основного потока. Механизм взаимодействия коротких гравитационных волн со средним потоком и его относительная роль в формировании КДК до сих пор до конца не изучены. Поскольку предполагается, что тип взаимодействия коротких и длинных экваториальных волн со средним потоком может быть разным, во всей работе рассматривались два механизма формирования КДК: взаимодействие длинных волн с зональным потоком и обрушение коротких гравитационных волн. Такое разделение имеет особое значение для построения моделей ОЦА, поскольку генерация крупномасштабных волн является

внутренним процессом, а гравитационные волны имеют подсеточный масштаб, и для их учета используются параметризации. Механизмы взаимодействия КДК от разных типов волн рассматривались на основе малопараметрических моделей, в первой главе исследованы следующие проблемы. Основные результаты этой главы представлены подробно в публикациях [1, 3], а также частично в [4, 5].

1. Степень взаимодействия длинных экваториальных волн со средним течением, в основе которого лежит поглощение волн на критических уровнях, должна зависеть от временного и пространственного разрешения соответствующей конечномерной аппроксимации. С математической точки зрения любая нелинейная модель, адекватно воспроизводящая КДК, должна порождать предельный цикл с периодом примерно 2 года в области параметров, близких к наблюдаемым. К этим параметрам естественно отнести и параметры пространственной и временной аппроксимации.

В качестве основной модели исследования КДК, порождаемого взаимодействием длинных волн и зонального течения, была взята модель Р. Пламба, описание и результаты которой приведены в п. 1.1 работы.

Исследуется следующая задача эволюции зонально-осредненной компоненты скорости ветра на экваторе.

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

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

$\bar{F}_n$  - усредненный поток количества движения, передаваемый среднему потоку от одной волны. В модели рассматривались две симметричные разнонаправленные волны с потоками количества движения, передаваемыми среднему течению:

$$\bar{F}_{1,2}(z) = \pm \rho F_0 \exp \left\{ -\int_0^z \frac{Nv}{k(u \mp c)^2} dz' \right\}.$$

Подробное описание модели и всех обозначений представлено в [1].

Коротко опишем основные результаты, полученные при исследовании возбуждения колебаний зональной скорости на основе взаимодействия длинных волн со средним течением. Показано, что для адекватного воспроизведения взаимодействия длинных планетарных экваториальных волн с зональным потоком на критических уровнях в экваториальной стратосфере необходимо высокое пространственное разрешение (< 500 м по вертикали).

На основе численных экспериментов были исследованы зависимости периода и амплитуды колебаний зонального ветра от определяющих параметров – горизонтального волнового числа  $k$  и фазовой скорости  $c$ , уровня ньютоновского выхолаживания и коэффициента вертикальной диффузии  $\nu$ , энергии источника длинных волн ( $F_0$  - начальный поток импульса). Получена следующая общая зависимость периода предельного цикла от параметров задачи может быть описана формулой:

$$T = A \cdot \frac{kc}{\nu F_0},$$

где  $A$  - размерный коэффициент пропорциональности (который может зависеть и от других параметров модели).

Помимо процесса распространения крупномасштабных экваториальных волн в стратосфере в моделях ОЦА должен быть реализован минимальный набор других атмосферных процессов, необходимых для осуществления механизма формирования КДК: взаимодействие длинных волн со средним течением происходит только при наличии некоторого диффузионного процесса (его роль выполняет ньютоновское выхолаживание); смена положительной и отрицательной фазы цикла зонального ветра осуществляется за счет процесса вертикального перемешивания (вертикальной диффузии), который играет большую роль при сильных градиентах скорости. При условии реализации описанных процессов можно ожидать воспроизведения КДК зонального ветра от взаимодействия с длинными волнами в моделях ОЦА. Однако результаты экспериментов с малопараметрической моделью Пламба показывают, что реализации описанного механизма в глобальных моделях не достаточно для возбуждения КДК, поскольку реалистичной энергии длинных экваториальных волн не хватает (в простой модели ее значение завышалось). Таким образом, необходимо учитывать весь спектр волновых движений на экваторе.

2. Вопрос определения ключевых параметров, ответственных за формирование периода и других характеристик КДК остается одним из ключевых для понимания КДК. Этот вопрос можно рассматривать на базе использованной малопараметрической модели. В п. 1.2 работы рассматривается вопрос выбора ключевых параметров, приводятся простые аналитические оценки зависимости периода КДК, возбуждаемого планетарными волнами, от различных параметров модели, позволяющие в принципе оценивать возможные колебания периодов, а также рассматривается проблема структурной устойчивости для этой задачи.

В работе проведена аналитическая оценка периода колебаний для модели Пламба, представленной выше. Для аналитических оценок периода КДК предполагалось, что профиль колебаний зональной скорости в модели уже сформировался, и использовалось его простое приближение. Подробное описание основных приближений и выкладок представлено в работе [4].

С помощью интегрирования уравнений модели получены оценки зависимости величины периода от параметров модели:

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

Показано, что полученные оценки находятся в полном согласии с результатами численных экспериментов, и полученной экспериментальной оценкой.

Рассмотрен вопрос определения ключевых процессов формирования КДК. Эта проблема в большой степени относится не к волновым параметрам, а к параметрам, определяющим внешние процессы (такие как вертикальная диффузия и перенос). Для модифицированной модели Пламба



проведено исследование проблемы структурной устойчивости КДК как предельного цикла. Этим проблемам посвящена публикация [5]. Сначала рассматривалась проблема устойчивости нулевого решения этой задачи и условия перехода к КДК как к предельному циклу. Затем проведены оценки роли вертикальных движений и диссипации в формировании КДК и его устойчивости. Показано, что ключевым процессом в формировании основных характеристик и структуры решения является процесс вертикальной диффузии. Также отмечено, что при формировании колебаний зонального ветра в экваториальной стратосфере важную роль играют восходящие вертикальные движения. Получены оценки границы устойчивости нулевого решения для параметров вертикальной диффузии и скоростей вертикального переноса. Такие же оценки получены с помощью численного моделирования.

3. Поскольку в моделях ОЦА с относительно грубым вертикальным разрешением реализовать механизм взаимодействия волн на критических уровнях едва ли возможно, то возникает вопрос – возможно ли получить реалистичные КДК, используя только параметризацию взаимодействия коротких гравитационных волн со средним потоком (т.е. с помощью механизма обрушения коротких волн, который реализован в модели ОЦА с грубым вертикальным разрешением). Подробное описание и результаты исследования этого механизма описаны в п. 1.3 работы.

Возникновение колебаний зональной скорости при взаимодействии среднего течения с короткими гравитационными волнами описывалось на основе построения малопараметрической модели, аналогичной модели Пламба, в которой механизм взаимодействия задавался в простой модели с помощью параметризации, предложенной К. Хайнсом. Она основана на теории доплеровского смещения средней части спектра гравитационных волн в область более высоких вертикальных волновых чисел, при которых происходит обрушение волны и передача среднему течению количества движения и энергии. Эта параметризация носит полуэмпирический характер, поскольку часть характеристик, существенных для теоретического построения, получается из статистической обработки данных наблюдений.

В основе модели лежит то же уравнение (что и в модели Пламба) для эволюции зонально-осредненной компоненты скорости на экваторе с теми же обозначениями:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} - \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial F_H}{\partial z}.$$

Правая часть  $F_H$  обозначает поток количества движения от обрушения волн, расчет которого проводился, следуя идеям, разработанным К. Хайнсом.

$$F_H(z) = \rho(z_0) \sigma(z_0)^2 k C (m_{ic}^+(z) - m_{ic}^-(z)).$$

$\sigma$  - среднеквадратичное отклонение, определяющие энергию волн,  $m$ ,  $k$  - вертикальное и горизонтальное волновые числа соответственно. Подробное описание построения этой модели приведено в [1].

Центральным результатом этой части работы является утверждение, что механизм обрушения коротких гравитационных волн самодостаточен для возбуждения колебаний зонального

экваториального ветра. При определенных условиях получались колебания, близкие к реально наблюдаемым КДК.

Основной задачей на следующем этапе было вычисление области ключевых параметров, по существу определяющих этот период. Показано, что реалистичные КДК возникают в узком диапазоне параметров модели, при этом характеристики полученного цикла сильно чувствительны как к параметрам самой модели. По результатам экспериментов в некотором узком диапазоне параметров, рекомендованных автором параметризации в качестве близких к наблюдениям, можно определить зависимость периода колебаний зональной скорости от определяющих параметров следующим образом:

$$T = B \cdot \frac{1}{k \sigma_0^2 m_{\min} \mu}.$$

$B$  - размерный коэффициент пропорциональности (который может зависеть от различных параметров модели).

4. Следующая задача состояла в исследовании относительной роли экваториальных волн разных масштабов в формировании КДК. Представляет интерес вопрос о том, какие именно волны определяют основные характеристики КДК зональной скорости в атмосфере и какой вклад вносят остальные волны. С этой целью на обобщенной малопараметрической модели взаимодействия коротких и длинных волн со средним течением должно быть исследовано совместное действие описанных механизмов возбуждения КДК. Полученные результаты описаны в п. 1.4 работы.

Модель построена по аналогии с предыдущими разделами, уравнение для эволюции осредненной компоненты зональной скорости имеет вид:

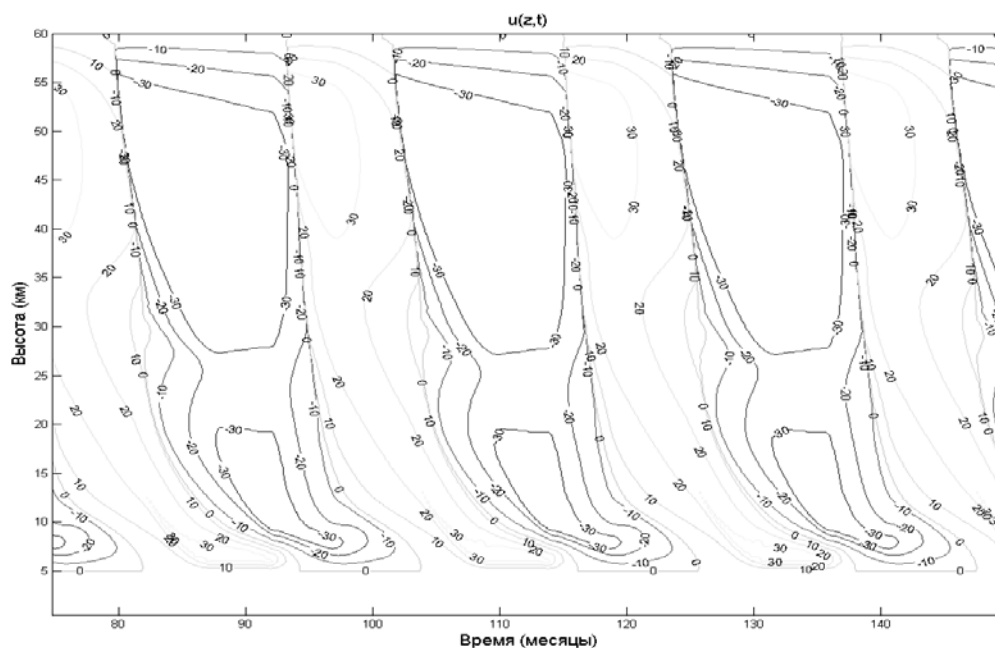
$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} - \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial (F_p + F_H)}{\partial z}.$$

Здесь величины  $F_p$  и  $F_H$  задают потоки количества движения от взаимодействия со средним течением длинных и коротких гравитационных волн соответственно.

Результаты численных экспериментов показывают, что при совместном действии этих механизмов распространение гравитационных волн происходит на фоне колебаний зональной скорости, обусловленных действием длинных волн, причем первичная роль в формировании периода и несимметрии восточной и западной фаз КДК принадлежит планетарным волнам, а гравитационные волны играют второстепенную роль, подкачивая дополнительную энергию в колебательную систему.

Для наглядной демонстрации модуляции длинными волнами колебаний, возбуждаемых короткими гравитационными волнами, на рис. 1 приведен результат численного эксперимента с более реальными не симметричными характеристиками длинных волн, при этом характеристики гравитационных волн оставались симметричными. Видно, что установился общий устойчивый несимметричный профиль колебаний.

В п. 1.5 приведено обсуждение результатов первой главы.



**Рис. 1**

Профиль зональной скорости, полученный численным решением совместной модели с несимметричными значениями фазовых скоростей и волновых чисел длинных волн. Величина скорости приведена в м/с, изолинии проведены с интервалом 10 м/с, темным выделены зоны западного ветра (отрицательное направление).

## **Глава 2**

Вторая глава посвящена моделированию КДК на основе моделей ОЦА, разрабатываемых в ИВМ РАН, и также содержит 5 разделов. Основные результаты этой главы представлены подробно в публикации [2].

Как уже отмечалось выше, основной целью данной работы является построение модели ОЦА, воспроизводящей реалистичные КДК зонального ветра в экваториальной стратосфере. Для решения этой проблемы за основу взята разработанная в ИВМ РАН модель, включающая тропосферу, стратосферу и мезосферу, с пространственным горизонтальным разрешением  $2^\circ \times 2.5^\circ$  и достаточно грубым вертикальным разрешением в 39 уровней. Принимая во внимание, что обозначенные ранее два механизма возбуждения КДК естественным образом разделяются в глобальных моделях, возникает задача оценки степени реализации того и другого механизма в модели ОЦА ИВМ РАН.

Для адекватного воспроизведения процесса поглощения длинных волн на критических слоях в модели была разработана новая модель ОЦА ИВМ РАН  $2^\circ \times 2.5^\circ \times 80$ , для которой была модифицирована вертикальная сетка: количество уровней повышено до 80, а шаг сетки в стратосфере был взят порядка 0.5 км (по результатам гл. 1).

Основной упор в исследованиях моделей ОЦА направлен на воспроизведение в них КДК. Исходя из описанных результатов первой главы работы при переходе к моделированию КДК с помощью моделей ОЦА во второй главе разбирались следующие вопросы.

1. На основании исследования двух механизмов возбуждения КДК и условий их реализации возникает задача предварительного исследования модели ОЦА на возможность воспроизведения обоих типов взаимодействия экваториальных волн со средним потоком в стратосфере. Общее описание

воспроизведения климата новой моделью  $2^\circ \times 2.5^\circ \times 80$  в сравнении с результатами модели  $2^\circ \times 2.5^\circ \times 39$ , а также анализ процессов, происходящих на экваторе, дадут достаточно полную картину крупномасштабной и волновой экваториальной динамики в стратосфере.

Описание климата модели ИВМ РАН  $2^\circ \times 2.5^\circ \times 80$  по результатам контрольных экспериментов в сравнении с реанализом данных наблюдений приведено в п. 2.1. Показано, что модель удовлетворительно воспроизводит основные климатические характеристики атмосферы – пространственные распределения полей ветра, температуры, давления, осадков, уровня волновой активности в средних широтах и др. Значительные улучшения по сравнению с предыдущими версиями модели ИВМ РАН наблюдаются в воспроизведении циркуляции в области тропопаузы и в стратосфере.

2. Точный ответ о степени взаимодействия волн и зонального потока в глобальных моделях атмосферы получить достаточно сложно, в первую очередь необходимо провести подробное исследование экваториальной динамики в контрольных экспериментах и отметить ключевые особенности, связанные с периодическими крупномасштабными процессами. Поскольку построенная нами новая версия модели ОЦА ИВМ РАН  $2^\circ \times 2.5^\circ \times 80$  призвана решить основную задачу – воспроизвести реалистичные КДК, необходимо изучить степень реализации исследованных нами механизмов возбуждения КДК от двух типов волн в разных версиях моделей ОЦА ИВМ РАН. Описание результатов анализа экваториальной динамики для моделей  $2^\circ \times 2.5^\circ \times 39$  и  $2^\circ \times 2.5^\circ \times 80$  приведено в п. 2.2.

Для модели  $2^\circ \times 2.5^\circ \times 39$  показано, что динамика зонального ветра и возникающие колебания в стратосфере на экваторе полностью обусловлены параметризацией гравитационно-волнового сопротивления, что подтверждает реализацию механизма возбуждения колебаний зональной скорости от обрушения мелкомасштабных волн в этой версии. Важно отметить, что при высокой волновой энергии модель ОЦА фактически точно воспроизводит результат моделирования колебаний в простой модели, однако при низких значениях волновой активности колебания не наблюдаются.

По данным контрольного эксперимента для модели  $2^\circ \times 2.5^\circ \times 39$  в слое 10-100 мбар в зональном ветре преобладают колебания с периодом в 1 год с сильно смещенным в зону с отрицательными скоростями. На данном этапе основным вопросом становится возможность воспроизведения реалистичных КДК в модели  $2^\circ \times 2.5^\circ \times 39$ , формируемых только через механизм обрушения гравитационных волн. Однако при значительных вариациях значений параметров не удалось получить реалистичные КДК на экваторе в этой версии модели. При снижении волновой энергии рассматриваемый механизм формирования колебаний от гравитационно-волнового сопротивления не доставляет достаточного количества движения зональному потоку и становится сравним по масштабам с другими экваториальными процессами.

Результаты контрольного эксперимента для модели  $2^\circ \times 2.5^\circ \times 80$  отличаются от предыдущей версии: в слое 10-100 мбар годовой цикл имеет малую амплитуду, а выделяется наличие двухлетних колебаний также со смещенным в зону восточных ветров средним значением. Можно предположить, что в этой модели реализуются оба механизма возбуждения колебаний зонального ветра. Также результаты новой 80-уровневой модели более соответствуют реально наблюдаемым мезосферным и

стратосферным ПГК. Это может говорить о хорошем воспроизведении волновой динамики во всей экваториальной атмосфере и усилении энергии самих волн.

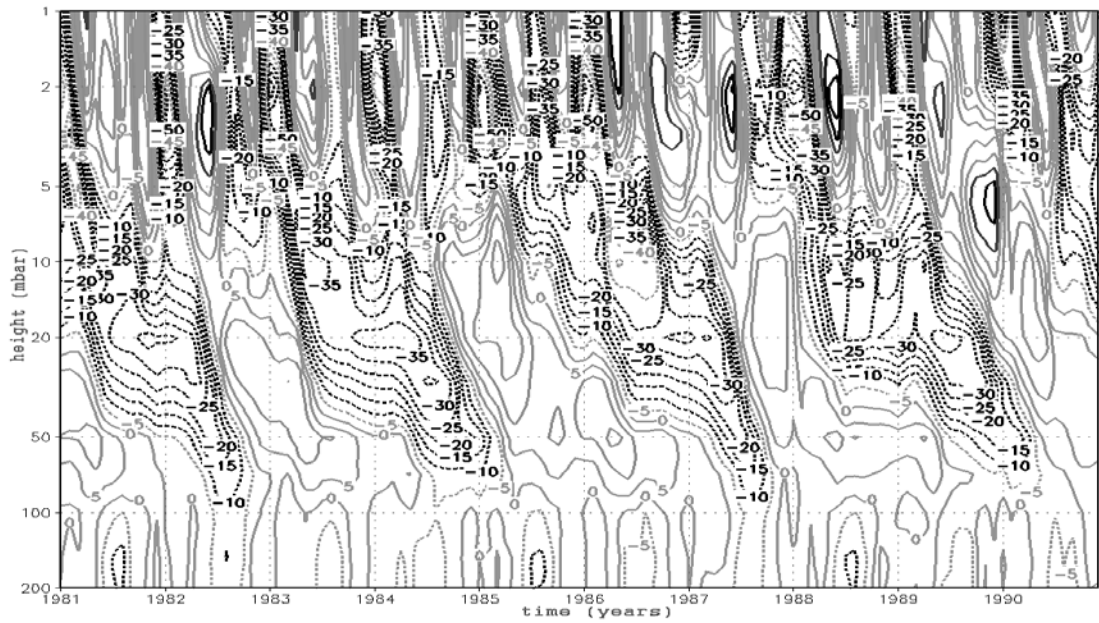
3. Для детального исследования динамики зонального ветра на экваторе в модели ИВМ РАН было необходимо провести спектральный анализ волновой активности в экваториальной стратосфере и оценить степень взаимодействия волн с зональным течением. Такой спектральный анализ проведен для оценки степени реализации описанных выше механизмов возбуждения КДК, результаты приведены в п. 2.3 работы. Они показывают, что волновая активность на экваторе в модели близка к наблюдаемой, и в новой версии модели реализуется взаимодействие длинных экваториальных волн с зональным течением.

4. При реализации процессов распространения и взаимодействия планетарных волн со средним течением на экваторе в новой модели ИВМ РАН возникает задача воспроизведения наиболее реалистичных КДК и исследования совместного действия обоих в модели ОЦА и сравнения результатов с п. 1.4. Описание результатов численных экспериментов по моделированию КДК в версии модели ОЦА ИВМ РАН  $2^\circ \times 2.5^\circ \times 80$  содержится в п. 2.4.

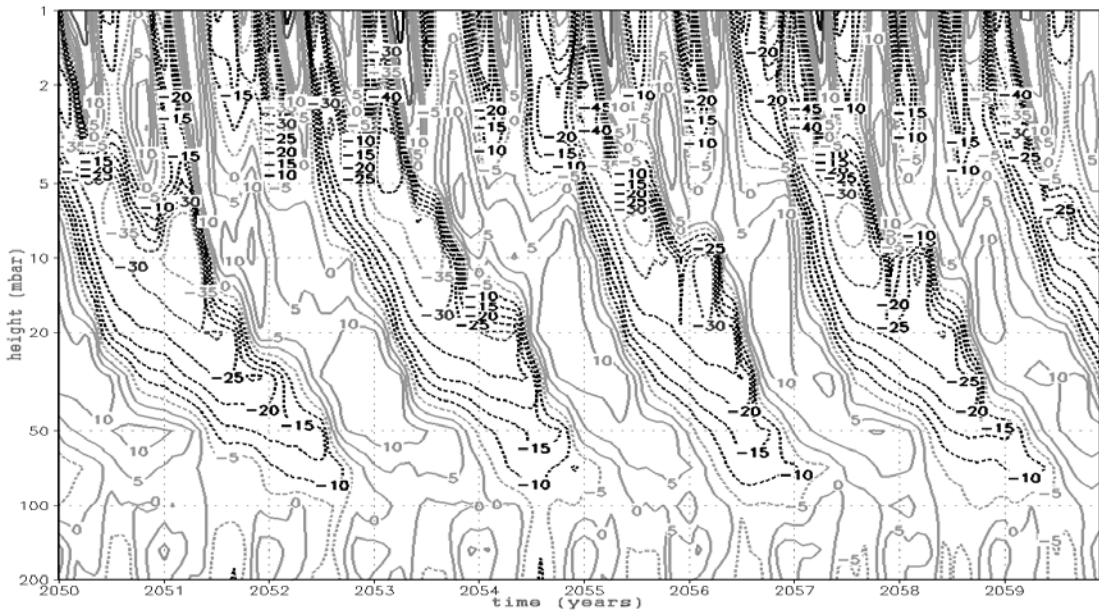
В новой версии модели ОЦА удалось воспроизвести КДК зонального ветра на экваторе, очень близкие к данным наблюдений. Данный результат является ключевым как в этой части, так и в работе в целом. Важным результатом изучения обеих версий модели  $2^\circ \times 2.5^\circ \times 39$  и  $2^\circ \times 2.5^\circ \times 80$  является подтверждение существенной роли процесса вертикальной диффузии в реализации механизмов возбуждения КДК в моделях ОЦА. Результаты моделирования механизмов возбуждения КДК говорят о том, что обрушение гравитационных волн занимает второстепенную роль в формировании характерного периода колебаний зонального ветра на экваторе при разумных значениях параметров и выходит на первый план лишь при больших энергиях мелкомасштабной волновой активности относительно волн планетарного масштаба. При этом взаимодействие длинных волн со средним течением создает колебания в более близкой к волновому источнику зоне, то есть в нижних слоях стратосферы. Этот результат полностью согласуется с результатами первой главы.

Наиболее существенный результат представлен на рис. 2, где приведена высотно-временная картина КДК зонального ветра в стратосфере и мезосфере на экваторе по используемым в этой работе данным реанализа наблюдений ERA40, а также численного эксперимента с моделью ОЦА ИВМ РАН при измененном параметре вертикальной диффузии в атмосфере. 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

В п. 2.5 приведено обсуждение результатов второй главы.



а



б

**Рис. 2**

Средний зональный ветер (м/с) на экваторе по данным реанализов наблюдений ERA40 (а) и эксперимента с моделью ИВМ РАН  $2^\circ \times 2.5^\circ \times 80$  (б) за 10 лет в высотной зоне от 200 до 0.003 мбар со стандартными значениями параметров гравитационно-волнового сопротивления и уменьшенном коэффициентом вертикальной диффузии ( $\Phi=0.03$  в стратосфере).

### Глава 3

В третьей главе подробно рассматриваются проблема синхронизации КДК с внешними процессами и вопросы формирования и устойчивости основных характеристик КДК, как по данным наблюдений, так и по данным моделирования. Проводится подробный анализ спектральных характеристик КДК и возможной синхронизации с ПГК или годовым циклом, рассматривается роль КДК в циркуляции экваториальной стратосферы. Глава содержит три раздела. Основные результаты этой главы рассмотрены в публикациях [4, 5].

При положительном разрешении проблемы воспроизведения КДК возникло множество практических вопросов о степени реалистичности данного цикла, его влиянии на другие процессы в атмосфере в целом, о чувствительности характеристик колебаний к различным вариациям параметров. Подобные проблемы особенно актуальны для развития моделей ОЦА. Среди основных проблем при исследовании формирования КДК наиболее существенной является проблема формирования периода колебаний, его устойчивости и его связи с полугодовой и годовой гармониками. Как отмечено выше, величина периода КДК носит достаточно стохастический характер. Отмечалось, что при вариации периодов предпочтительные периоды КДК по данным анализа наблюдений на отдельных кратны полугоду. Механизм дискретной изменчивости периода КДК по данным наблюдений является темой современных дискуссий.

Помимо отмеченного выше основополагающего механизма нелинейного взаимодействия экваториальных волн разных масштабов с зональным потоком, существенный вклад в формирование КДК могут вносить 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. Механизмы формирования ПГК подробно не рассматривались, однако на основе модели ОЦА можно проследить взаимосвязь взаимодействия экваториальных волн со средним течением и этого процесса. Стоит отметить, что возбуждение ПГК в верхней стратосфере до сих пор мало изучено. На данный момент не существует единого мнения по поводу основных причин окончательного формирования периода КДК, при этом существует ряд противоречащих друг другу гипотез.

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

1. В п. 3.1 на основе методики, изложенной подробно в п. 1.2 приводятся простые аналитические оценки зависимости периода КДК, позволяющие в принципе оценивать возможные колебания периодов, а также результаты численных экспериментов с малопараметрическими моделями (описанными в первой главе), позволяющими утверждать, что синхронизация КДК и ПГК в верхней стратосфере может осуществляться через механизм взаимодействия волн со средним потоком в широком спектральном диапазоне, в частности, и через механизм взаимодействия коротких гравитационных волн со средним потоком. На основе этих оценок подробно исследуется роль вертикальных движений и диссипации в формировании КДК и его устойчивости.

Получена следующая оценка периода КДК для модифицированной модели Пламба с внешним воздействием  $f(z, t)$ :

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

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). 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 циклам в верхних слоях, при этом в этом процессе роль коротких волн представляется более значимой.

2. В п. 3.2 приводятся результаты обработки данных реанализов наблюдений и модели для различных высот (спектры и гистограммы), которые показывают, что определенная синхронизация фаз ПГК и КДК имеет место. При этом КДК и ПГК рассматриваются как общая система циркуляции экваториальной атмосферы, на основе результатов предыдущих исследований и численных экспериментов с моделью ОЦА ИВМ РАН изучается проблема устойчивости КДК и вопросы взаимной модуляции КДК и ПГК.

Показано, что 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. Анализ данных наблюдений и моделирования показывает, что определенная синхронизация КДК и ПГК (а возможно и годового цикла) имеет место. 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.

Отметим, что параметризация коротких гравитационных волн в модели ОЦА ИВМ РАН важна для воспроизведения как КДК, так и ПГК.

Также на основе численных экспериментов с моделью ОЦА ИВМ РАН исследована чувствительность характеристик КДК к величине вертикальной диффузии. Результаты этих экспериментов показывают удовлетворительное согласие с оценками, полученными для



малопараметрических моделей. Результаты численного моделирования и данных наблюдений показывают взаимную модуляцию КДК и ПГК, при этом ПГК модулирует КДК по фазе, а КДК модулирует ПГК по амплитуде.

В п. 3.3 приводится обсуждение основных результатов этой главы.

### **Заключение**

В заключении работы кратко приводятся ее основные результаты.

### **Приложение**

В приложении описаны вычислительные технологии, используемые при работе с моделями ОЦА ИВМ РАН, и проведен краткий анализ эффективности параллельного счета с этими моделями.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

Кратко сформулируем основные результаты работы.

1. С помощью малопараметрических моделей, описывающих взаимодействие планетарных волн и коротких гравитационных волн со средним потоком, исследованы необходимые условия, которым должны удовлетворять модели ОЦА, чтобы они успешно воспроизводили квазидвухлетние колебания атмосферной циркуляции. Показано, что каждый тип волн при определенных параметрах способен формировать колебания зональной скорости, близкие к наблюдаемым КДК. Исследованы зависимости периода возникающих колебаний от основных параметров, характеризующих механизмы взаимодействия волн со средним потоком. Выделен процесс вертикальной диффузии как ключевой в формировании основных характеристик КДК и их устойчивости. На основе малопараметрической модели совместного действия описанных выше механизмов формирования КДК показано, что ключевую роль в становлении периода КДК и амплитуды в нижних слоях играют планетарные волны, в то же время короткие гравитационные волны переносят энергию и определяют характеристики КДК в верхних слоях.

2. Построена новая современная версия модели ОЦА ИВМ РАН с высоким пространственным разрешением ( $2^\circ$  по широте,  $2.5^\circ$  по долготе, 80 уровней по вертикальной координате). Проведены численные эксперименты по воспроизведению данной моделью современного климата. Показано, что модель удовлетворительно воспроизводит основные климатические характеристики атмосферы – распределения полей ветра, температуры, давления, осадков, уровня волновой активности в средних широтах и экваториальной зоне и др. Показано, что в построенной модели ОЦА выполняются условия реализации обоих исследуемых механизмов КДК, волновая активность на экваторе близка к наблюдаемой и модель успешно воспроизводит КДК и ПГК с характеристиками, близкими к наблюдаемым.

3. С помощью аналитических оценок и численных экспериментов с малопараметрическими моделями показана возможная синхронизация КДК и ПГК в переходной области между ними. Показано, что механизм обрушения гравитационных волн может являться важным связующим звеном в явлениях синхронизации. На основе анализа данных наблюдений и моделирования с помощью модели ОЦА

показано, что определенная синхронизация КДК и ПГК имеет место. Также имеет место взаимная модуляция КДК и ПГК. Результаты численных экспериментов с моделями ОЦА ИВМ РАН и малопараметрическими моделями показывают, что процесс формирования характеристик КДК наиболее чувствителен к параметру вертикальной диффузии, при определенных соотношениях параметров возможны бифуркации. Таким образом, основываясь на полученных результатах, можно предположить, что формирование КДК от разных типов волн вместе с ПГК и годовым циклом можно рассматривать как единую систему колебаний в циркуляции экваториальной верхней атмосферы.

#### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ**

1. 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.
2. 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.
3. Кулямин Д.В., Дымников В.П. Моделирование квазидвухлетних колебаний зонального ветра в экваториальной стратосфере. // Труды МФТИ. 2009. Т. 1. № 1. С. 65-71.
4. Кулямин Д.В., Дымников В.П. Спектральные характеристики квазидвухлетних колебаний экваториального стратосферного ветра и проблема синхронизации. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 4. С. 1-19.
5. Dymnikov V.P., Kulyamin D.V. Structural stability of quasi-biennial oscillations of zonal wind in the equatorial stratosphere. // Rus. J. Numer. Anal. and Math. Modelling. 2010. V.25. № 3. P. 235-251