

УДК 551.509.336

КВАЗИДВУХЛЕТНИЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ СТРАТОСФЕРЕ: СЕЗОННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ВЕТРА, ДИСКРЕТНОСТЬ ПЕРИОДА ЦИКЛА И ПРОГНОЗ ЕГО ДЛИТЕЛЬНОСТИ

© 2011 г. И. П. Габис, О. А. Трошичев

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург

e-mail: gabis@aari.nw.ru; olegtro@aari.nw.ru

Поступила в редакцию 13.08.2010 г.

После доработки 06.12.2010 г.

Изменения вертикальной структуры ветра экваториальной стратосферы в квазидвухлетнем цикле (КДЦ) демонстрируют отчетливую связь с сезонами года. Спуск режима восточного ветра из средней в нижнюю стратосферу всегда имеет стационарный период – стадию стагнации. При этом нижняя граница восточного ветра в разных КДЦ расположена на различной высоте в диапазоне от ~22 до ~26 км, но в каждом индивидуальном КДЦ она практически постоянна на протяжении всего периода стагнации. Стагнация всегда начинается в солнцестояние (в июне–июле или в декабре–январе). Возобновление спуска после стагнации всегда начинается только около равноденствия – в марте–апреле или в сентябре–октябре. Следовательно, длительность стагнации изменяется дискретно, и в разных циклах может быть равна одному, трем или пяти сезонам (трем, девяти или пятнадцати месяцам, соответственно). Если период КДЦ определять как интервал между начальными моментами последовательных стадий стагнации, то он должен изменяться также дискретно и может быть равен 24, 30 или 36 месяцам. Зависимость многих атмосферных явлений, влияющих на климат Земли, от фазы КДЦ обуславливает необходимость прогноза эволюции КДЦ. Установленная сезонная закономерность и вытекающая из нее дискретность периода КДЦ позволяют осуществлять прогноз развития КДЦ, его длительности и моментов изменения фаз цикла.

1. ВВЕДЕНИЕ

Квазидвухлетние осцилляции обнаруживаются во многих атмосферных параметрах и процессах. При этом наблюдаются либо собственно вариации параметров с квазидвухлетним периодом, либо отмечается соответствие характеристик некоторого явления определенным фазам квазидвухлетнего цикла (КДЦ). Тип фазы КДЦ – восточная (E) или западная (W) – определяется по направлению зонального ветра экваториальной стратосферы. Чередующаяся картина восточных и западных воздушных потоков, т.е. КДЦ ветра, наблюдается вдоль всего экватора в диапазоне широт $\pm 12^\circ$ [Dunkerton and Delisi, 1985]. Амплитуда изменений скорости ветра максимальна над экватором и быстро уменьшается с ростом широты. КДЦ фиксируется в слое от ~100 гПа (~16 км) до ~3 гПа (~40 км) [Baldwin et al., 2001]. Суть явления состоит в непрерывном спуске со скоростью примерно 1 км/мес. противоположно направленных ветровых режимов [Naujokat, 1986]. В течение каждого КДЦ происходит смещение области, занимаемой ветром определенного направления, из средней стратосферы в нижнюю; при этом на “освободившемся” месте появляется ветер противоположного направления, который в свою очередь начинает спуск в нижние слои.

Многочисленные исследования продемонстрировали исключительно важную роль экваториального КДЦ в земной атмосфере, КДЦ оказывает влияние на химический состав и динамические процессы в глобальном масштабе. Взаимосвязь КДЦ с общей циркуляцией атмосферы приводит к существенным различиям атмосферных процессов в течение противоположных фаз КДЦ. Например, в зависимости от фазы КДЦ изменяются характер и интенсивность циркуляции в высоких и умеренных широтах [Кац, 1968; Holton and Tan, 1980]. От КДЦ-фазы зависят стабильность и мощность полярного вихря, вероятность стратосферных потеплений [Holton and Tan, 1980; Labitzke, 1982], уровень весенней депрессии содержания озона в Антарктике [Lait et al., 1989], интенсивность циркуляции Брюера-Добсона [Labitzke, 2004], и, следовательно, перенос озона и других малых газовых компонент из тропиков в высокоширотные области. Выявлено воздействие КДЦ на озоновый слой в умеренных и высоких широтах [Oltmans and London, 1982; Logan et al., 2003]. Установлена связь экваториального КДЦ ветра с вариациями в температуре и давлении в экваториальной и внетропической зонах стратосферы и тропосферы [Baldwin et al., 2001]. Статистически значимые корреляции при анализе влияния Солнца на атмосферу обнаружены при разделе-

нии экспериментального материала на группы с учетом фазы КДЦ [Labitze, 2004; 2005].

Зависимость многих атмосферных явлений, влияющих на метеоусловия и климат Земли, от фазы КДЦ определяет необходимость прогноза фаз КДЦ. Знание перспективного состояния циркуляции в экваториальной стратосфере необходимо для планирования экспериментов, для прогноза влияния вариаций солнечной активности на климатические изменения, для лучшего понимания и предсказания трендов и изменчивости атмосферного озона и т.д.

Цель данной работы состоит в исследовании возможности прогноза фаз КДЦ на основе установленных сезонных закономерностей его эволюции. В разделе 2 представлен краткий обзор исследований по выявлению сезонных зависимостей развития КДЦ и их применения для прогноза изменения фаз КДЦ. В разделе 3 описаны использованные данные, метод анализа и суммированы результаты о связи изменений зонального ветра в экваториальной стратосфере с сезонами года. В разделе 4 продемонстрированы возможности прогнозирования развития КДЦ и приводится методика прогноза. Раздел 5 содержит выводы.

2. ОБЗОР РАБОТ ПО ИЗУЧЕНИЮ СЕЗОННЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ И ПРОГНОЗУ ФАЗ КДЦ

При исследовании влияния экваториального КДЦ на различные процессы и взаимосвязи в атмосфере Земли для определения типа КДЦ-фазы в каждом частном случае выбирают тот высотный уровень в диапазоне от 50 до 25 гПа, для которого результат анализа явлений в сравнении с КДЦ-фазами оптимален [Baldwin et al., 2001]. Период КДЦ равен сумме длительностей противоположных фаз цикла и изменяется в диапазоне от 17 до 38 месяцев при среднем значении около 28 месяцев [Naujokat, 1986]. При этом период изменяется не только от цикла к циклу, но и в пределах одного и того же цикла имеет разную продолжительность на разных высотах, что обусловлено значительной изменчивостью и зависимостью от высоты длительности фаз КДЦ (вариации в диапазоне от 5 до 27 мес. [Naujokat, 1986]).

Поиски сезонных закономерностей смены фаз КДЦ предпринимались неоднократно. Подробный анализ для фиксированных высотных уровней показал, что на высоте 50 гПа вероятность изменения типа фазы зависит от сезона [Dunkerton and Delisi, 1985; Dunkerton, 1990]. Однако, так как изменения фазы КДЦ могут происходить в любой месяц года, подчеркивается, что сезонный цикл только модулирует начало фаз, но эта модуляция недостаточно сильна, чтобы можно было говорить о точной синхронизации КДЦ с сезонами. Синхронизация в

точном значении этого термина предполагает, что циклы начинаются всегда в один и тот же момент или моменты года, т.е. в пределах точности экспериментальных данных распределение дат изменения типа фазы должно иметь вид одной или более дельта-функций [Dunkerton and Delisi, 1997]. В работе [Wallace et al., 1993] выявлена существенная модуляция скорости изменения КДЦ-фаз годовым циклом при незначительной связи собственно фаз КДЦ с календарными месяцами. Результаты [Wang and Fraedrich, 1995] не показали отчетливой модуляции КДЦ годовым циклом. В исследовании [Kinnersley and Pawson, 1996] установлена зависимость от времени года для восточного ускорения зонального ветра. По мнению авторов работы [Груздев и Безверхний, 1999], показавших, что колебания скорости в основном имеют периоды 24 и 30 месяцев, два преобладающих режима осцилляций с периодами, находящимися в дробно-рациональном отношении к годовому периоду, указывают на возможность синхронизации КДЦ с годовым ходом.

Теоретические модели генерации КДЦ в основном связаны с механизмом, предложенным в теории Холтона–Линдзена [Holton and Lindzen, 1972], который объясняет возбуждение КДЦ взаимодействием экваториальных волн различного типа со средним зональным потоком. При этом источники волн, как правило, описываются постоянными во времени, поэтому наличие сезонного контроля периода модельных КДЦ априори исключается [Холтон, 1988].

В работе [Naujokat, 1986] была построена экспериментальная модель среднего КДЦ в виде высотно-временного разреза для зональной скорости ветра, которую можно было бы использовать для прогноза изменения фаз КДЦ. Располагая информацией о текущем состоянии КДЦ и сведениями из модели о средних значениях задержки между обращениями фаз на соседних уровнях, можно оценить перспективу развития текущего цикла и таким образом осуществить прогноз времени наступления определенной КДЦ-фазы на заданном уровне. Однако, из-за существенных отклонений параметров индивидуальных циклов от средних значений степень неопределенности при таком прогнозе достаточно высока, и модель позволяет предсказывать сроки изменения фаз КДЦ только на ближайшие месяцы.

Учет зависимости вероятности изменения фазы от месяца года лишь незначительно увеличивает возможности прогноза [Dunkerton, 1990]. Модель, предложенная в работе [Wallace et al., 1993], дополнительно учитывает зависимость скорости изменения фазы от годового цикла, что позволяет осуществлять прогноз фазы КДЦ с немного большей точностью, чем по модели, базирующейся на средней скорости спуска противоположных фаз. По мнению авторов статьи [Fraedrich et al., 1993], периоды стагнации в рас-

пространении восточной фазы цикла в нижние слои стратосферы являются непредсказуемой особенностью КДЦ, что, очевидно, ограничивает возможности прогноза эволюции КДЦ.

В работе [Dunkerton and Delisi, 1997] интервал 1962–1991 г. был аппроксимирован последовательностью циклов 24- и 36-месячной продолжительности, и, возможно, одним или двумя 30-месячными циклами. Однако построенные высотно-временные разрезы средних циклов продолжительностью два и три года не позволяют прогнозировать КДЦ. Как отмечают авторы [Dunkerton and Delisi, 1997], длительность текущего цикла не влияет на продолжительность следующего КДЦ; кроме того, максимум западного ветра не всегда наблюдается в одно и то же время по отношению к началу западной фазы; быстрый спуск зоны западного ветра не гарантирует более короткого последующего цикла, так как суммарный период КДЦ зависит также от скорости спуска зоны восточного ветра, который в некоторых циклах демонстрирует торможение на высоте около 30 гПа в период между июлем и февралем.

Следовательно, как теоретическое моделирование, так и анализ экспериментальных данных традиционными методами (определение периода КДЦ, длительности противоположных фаз или вероятности фазовых переходов в разные месяцы года на фиксированных высотах, спектральный анализ временных рядов и т.п.) не выявляют четкой синхронизации с сезонами года эволюции КДЦ ветра в экваториальной стратосфере. В научных работах доминирует точка зрения о том, что КДЦ ветра не контролируется годовым или полугодовым циклами: изменения фазы могут происходить в любой месяц года, и близость среднего периода КДЦ к удвоенному годовому является просто статистическим результатом [Холтон, 1988; Baldwin et al., 2001]. Экспериментальные модели средних циклов, учитывающие сезонные модуляции, не позволяют осуществлять достоверный долгосрочный прогноз развития КДЦ, проблема предсказания момента изменения фазы цикла и точной его длительности остается нерешенной.

В работах [Габис и Трошичев, 2005; Gabis and Troshichev, 2004; 2005; 2006; 2008] был использован метод изучения КДЦ с помощью анализа высотной структуры зонального потока по среднемесячным профилям скорости ветра. В результате установлена ранее не известная закономерность эволюции КДЦ. Показано, что определенные изменения вертикальной структуры ветра в квазидвухлетнем цикле (см. раздел 3) демонстрируют отчетливую связь с сезонами года. Это обуславливает дискретно изменяющийся период цикла, который может быть равен только 24, 30 или 36 месяцам, и позволяет осуществлять заблаговременный прогноз развития КДЦ, его длительности и моментов изменения фазы цикла.

3. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭВОЛЮЦИИ ЗОНАЛЬНОГО ВЕТРА ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ СТРАТОСФЕРЫ

3.1. Экспериментальные данные и метод исследования.

В анализе использованы данные измерения скорости ветра на экваториальных станциях о-ва Кантон (англ. Canton Island) (02°46' S, 171°43' W) для 1953–1967 г., о-ва Ган (Мальдивы) (англ. Gan/Maldivian Island) (00°41' S, 73°09' E) для 1967–1975 г. и Сингапур (англ. Singapore) (01°22' N, 103°55' E) для 1976–2009 г. [Labitzke and Collaborators, 2002; <http://www.geo.fu-berlin.de/en/met/ag/strat/produkte/qbo/index.html>].

Изменения вертикальной структуры ветра в ходе КДЦ анализировались по среднемесячным высотным профилям скорости в области от 70 до 10 гПа. Граница раздела противоположно направленных воздушных течений называется зоной сдвига (англ. shear) скорости. По общепринятой терминологии нижняя граница спускающейся области западного ветра (направленного с запада на восток) называется зоной западного сдвига (или W-сдвига), а нижняя граница области восточного ветра (направленного с востока на запад) — зоной восточного сдвига (или E-сдвига). Таким образом, наблюдаемое изменение ветра в каждом КДЦ связано с последовательным спуском в средней и нижней экваториальной стратосфере восточного и западного сдвигов скорости ветра.

3.2. Стадия стагнации.

При средней скорости спуска зоны сдвига, равной 1 км/мес., имеют место значительные отклонения от среднего значения в каждом конкретном КДЦ. Кроме того, средняя скорость различается для W- и E-сдвигов (1.2 и 0.8 км/мес., соответственно [Naujokat, 1986]). Однако, в верхней и нижней частях слоя наблюдения КДЦ значения скорости спуска зон противоположных сдвигов близки друг к другу. Замедление восточного сдвига проявляется лишь в среднем по высоте и связано с его торможением в области 30–50 гПа. Существование периодов так называемой “стагнации”, когда на несколько месяцев приостанавливается спуск восточного ветра в нижнюю стратосферу, является важной особенностью эволюции КДЦ, так как характеризует существенное различие в поведении противоположных — восточного и западного — режимов ветра. Стадии стагнации приводят к более быстрому и равномерному спуску режима западного ветра по сравнению с режимом восточного ветра, что в свою очередь объясняет хорошо известную зависимость средней длительности фаз от высоты — убывания продолжительности W-фазы и роста длительности E-фазы при увеличении высоты [Naujokat, 1986; Холтон, 1988; Dunkerton, 1990; Baldwin et al., 2001].

На рисунке 1а представлен пример изменения профилей скорости ветра в 1988–1989 гг. В течение января–июня 1988 г. наблюдается регулярное уменьшение высоты нижней границы восточного ветра от уровня выше 10 гПа до $\sim(32–35)$ гПа. В дальнейшем, в период с июля 1988 по март 1989 г. в течение девяти месяцев высота зоны сдвига или границы между восточным и западным ветром остается практически постоянной. Только в апреле 1989 г. спуск восточного ветра в нижние слои возобновился. В течение периода стагнации изменения скорости ветра имеют место только на уровне ~ 10 гПа и обусловлены, очевидно, влиянием полугодового цикла осцилляций, существующего в верхней стратосфере.

Торможение в процессе спуска Е-сдвига в литературе отмечают достаточно часто, но при этом, как правило, имеют в виду продолжительные стагнации (подобные представленной на рис. 1а), т.е. те, которые отчетливо видны на высотно-временных разрезах скорости [Naujokat, 1986; <http://www.geo.fu-berlin.de/en/met/ag/strat/produkte/qbo/index.html>]. Однако, как показал анализ профилей за 56-летний интервал 1953–2009 гг., спокойные периоды продолжительностью несколько месяцев (не менее трех месяцев) в процессе спуска восточного сдвига всегда разделяют периоды интенсивных изменений скорости и высоты Е-сдвига в слое выше 20–40 гПа и в слое ниже этого уровня. На рисунках 1б, в и г представлены три примера стадий стагнации в разных КДЦ. Первая группа профилей во всех примерах демонстрирует регулярное уменьшение высоты Е-сдвига от ~ 10 до 30–40 гПа. Вторая группа профилей соответствует периоду стагнации, в течение которого высота сдвига остается постоянной. И, наконец, по третьей группе профилей видно возобновление спуска Е-сдвига в нижние слои стратосферы после стадии стагнации.

Важно подчеркнуть, что в разных КДЦ высота области стагнации может быть разной и изменяется в диапазоне от ~ 40 до ~ 20 гПа (22–26 км). Так, из примеров на рис. 1б–г видно, что в 1995–1996 гг. высота зоны сдвига скорости равна ~ 40 гПа, в 1997–1998 гг. – ~ 35 гПа и в 2004–2005 гг. – ~ 30 гПа. При этом в каждом конкретном КДЦ высота зоны сдвига практически не изменяется на протяжении всего периода стагнации. Изменения скорости ветра вблизи зоны сдвига пренебрежимо малы. Однако на высотно-временных разрезах скорости трехмесячные торможения спуска Е-сдвига не настолько заметны, как длительные стагнации. Именно поэтому факт наличия во всех КДЦ стадии стагнации в процессе спуска Е-сдвига не был отмечен ранее. Необходимо заметить, что в течение стадии стагнации могут наблюдаться незначительные нерегулярные флуктуации высоты зоны сдвига (нерегулярное чередование спусков и подъемов). Свидетельством начала стадии стагнации должно быть отсутствие в течение нескольких месяцев регулярного спуска Е-сдвига от

данного месяца к следующему. Соответственно, свидетельством окончания стагнации может служить только регулярное уменьшение высоты зоны сдвига, т.е. в каждом последующем месяце высота должна быть меньше, чем в предыдущем месяце.

3.3. Три типа сценария эволюции КДЦ.

С помощью анализа высотных профилей скорости можно достаточно легко выявить стационарные периоды при спуске области восточного ветра, то есть стадии стагнации, в течение которых высота границы раздела противоположных воздушных потоков практически не меняется, при этом выше 20–40 гПа наблюдается восточный ветер, а в нижней стратосфере – западный ветер. В таблице 1 представлены результаты разделения всего интервала наблюдений с 1953 по 2008 г. на периоды, определенные как промежутки между начальными моментами последовательных стадий стагнации.

Оказалось, что стадия стагнации начинается всегда вблизи солнцестояния – либо в декабре–январе, либо в июне–июле. Следовательно, если период КДЦ определять как интервал между начальными моментами последовательных стадий стагнации, то окончание текущего (начало следующего) цикла имеет место в декабре (январе) или июне (июле). Таким образом, период квазидвухлетнего цикла должен изменяться дискретно и может быть равен только 24, 30 или 36 месяцам. В течение интервала с 1953 г. по 2008 г. можно выделить 24 полных цикла, при этом почти половина из них – 11 циклов – имела продолжительность 24 месяца, или 2 года. Все эти циклы начались в январе, т.е. сразу после декабрьского солнцестояния. Пять циклов, также начавшиеся в январе, длились по 30 месяцев, или 2.5 года. Следовательно, эти циклы завершились вблизи июньского солнцестояния, что обусловило появление пяти циклов с началом в июле. Шестой цикл с началом в июле наблюдался в 1953–1955 гг. Все начавшиеся в июле циклы имели длительность 30 месяцев. Кроме того, наблюдалось два аномально продолжительных цикла с началом в январе и длиной 36 месяцев, или три года.

Изменения скорости и направления ветра в средней и нижней экваториальной стратосфере в ходе КДЦ происходят в следующей последовательности. Пусть в период времени, предшествующий декабрьскому солнцестоянию, наблюдается спуск зоны восточного сдвига в средней стратосфере. Соответствующие изменения скорости и высоты Е-сдвига завершают предыдущий квазидвухлетний цикл. Спуск Е-сдвига прекращается вблизи солнцестояния. Момент начала стадии стагнации фиксируется по отсутствию изменений профилей от декабря к январю. (Далее в тексте для краткости начало и окончание стагнации указывается двумя месяцами, например “декабрь–январь”). При этом в средней стратосфере устанавливается восточный ветер, а в

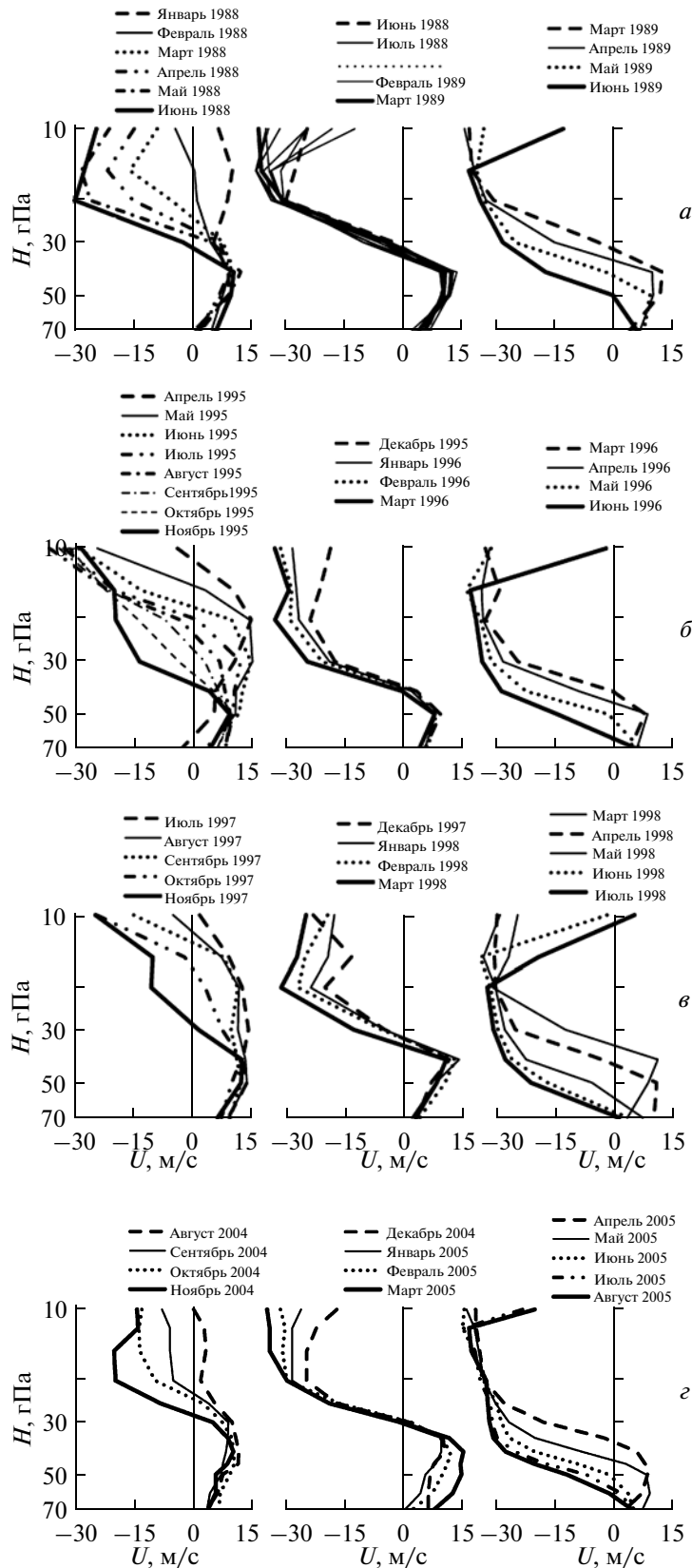


Рис. 1. Изменение высотных профилей среднемесячной зональной скорости ветра для интервалов с января 1988 по июнь 1989 г. (*a*), с апреля 1995 по июнь 1996 г. (*б*), с июля 1997 по июль 1998 г. (*в*) и с августа 2004 по август 2005 г. (*г*).

Таблица 1. Квазидвухлетние циклы в период с июля 1953 по декабрь 2008 г.

Временной интервал	Номер КДЦ	24-месячный сценарий	30-месячный сценарий		36-месячный сценарий
			начало в январе	начало в июле	
2.5 года 1953–1955	1			Июль 53–Дек. 55	
8 лет 1956–1963	2	Янв. 56–Дек. 57			
	3	Янв. 58–Дек. 59			
	4	Янв. 60–Дек. 61			
	5	Янв. 62–Дек. 63			
6 лет 1964–1969	6				Янв. 64–Дек. 66
	7				Янв. 67–Дек. 69
6 лет 1970–1975	8	Янв. 70–Дек. 71			
	9	Янв. 72–Дек. 73			
	10	Янв. 74–Дек. 75			
20 лет 1976–1995	11		Янв. 76–Июнь 78		
	12			Июль 78–Дек. 80	
	13		Янв. 81–Июнь 83		
	14			Июль 83–Дек. 85	
	15		Янв. 86–Июнь 88		
	16			Июль 88–Дек. 90	
	17		Янв. 91–Июнь 93		
	18			Июль 93–Дек. 95	
4 года 1996–1999	19	Янв. 96–Дек. 97			
	20	Янв. 98–Дек. 99			
5 лет 2000–2004	21		Янв. 00–Июнь 02		
	22			Июль 02–Дек. 04	
4 года 2005–2008	23	Янв. 05–Дек. 06			
	24	Янв. 07–Дек. 08			

нижней стратосфере сохраняется западный ветер. Это начало текущего КДЦ. Последующие изменения развиваются по одному из трех возможных сценариев.

1) 24-месячный сценарий КДЦ: три месяца, или один сезон, после декабрьского солнцестояния наблюдается практически стационарный профиль с восточным ветром выше ~ (20–40) гПа и западным – ниже этой высоты (стадия стагнации). В первое равноденствие (в марте–апреле) стадия стагнации завершается. В течение последующих семи сезонов (21-ого месяца), профиль скорости претерпевает изменения, в результате которых около очередного солнцестояния (декабрь–январь) вновь начинается стадия стагнации. То есть текущий КДЦ заканчивается.

2) 30-месячный сценарий КДЦ: как и в случае 24-месячного сценария, вблизи солнцестояния (в декабре–январе) начинается стадия стагнации, однако в первое равноденствие (март–апрель) измене-

ния, соответствующие возобновлению спуска восточного ветра в нижнюю стратосферу, не развиваются. Спуск зоны восточного сдвига возобновляется лишь спустя девять месяцев (после начала стагнации) во второе равноденствие, т.е. в сентябре–октябре. Таким образом, стагнация в данном сценарии длится три сезона. Последующие семь сезонов такие же, как и в 24-месячном сценарии. Следовательно, весь процесс от начала стадии стагнации до начала стадии стагнации следующего цикла продолжается 30 месяцев.

Очевидно, что окончание только что описанного типа сценария приходится на июньское солнцестояние. Поэтому стадия стагнации очередного цикла начинается в июле. Все циклы в интервале 1953–2008 гг. с началом в июле имели продолжительную трехсезонную стадию стагнации. Следовательно, ее окончание наблюдалось вблизи равноденствия в марте–апреле следующего года. Дальнейшие изменения профилей развивались в течение последую-

Таблица 2. Продолжительность стадии стагнации

Тип сценария КДЦ	Число циклов за период 1953–2008 гг.	1-ый сезон С/С* → Р/Д*	2-ой сезон Р/Д → С/С	3-ий сезон С/С → Р/Д	4-ый сезон Р/Д → С/С	5-ый сезон С/С → Р/Д
24 месяца январь	11 циклов	Январь Февраль Март				
30 месяцев январь	5 циклов	Январь Февраль Март	Апрель Май Июнь	Июль Август Сентябрь		
30 месяцев июль	6 циклов	Июль Август Сентябрь	Октябрь Ноябрь Декабрь	Январь Февраль Март		
36 месяцев январь	2 цикла	Январь Февраль Март	Апрель Май Июнь	Июль Август Сентябрь	Октябрь Ноябрь Декабрь	Январь Февраль Март

Примечание: * Обозначения в таблице: С/С – солнцестояние, Р/Д – равноденствие.

щих семи сезонов, и в соответствующее солнцестояние в декабре цикл завершился.

3) 36-месячный сценарий КДЦ: стадия стагнации продолжается не один сезон, как в 24-месячном сценарии, и не три сезона, как в 30-месячном сценарии, а пять сезонов (15–16 месяцев), увеличивая тем самым общую продолжительность цикла до 36 месяцев. Период после окончания стадии стагнации текущего цикла до начала очередного цикла имеет длительность семь сезонов, так же как и в других типах сценария.

В таблице 2 представлена информация о длительности стадий стагнации для всех КДЦ в интервале с 1953 по 2008 г. В первой колонке указан тип сценария и месяц начала цикла. Во второй колонке – число циклов соответствующего сценария. Колонки с третьей по седьмую соответствуют последовательным сезонам, или трехмесячным временным интервалам, каждый из которых начинается либо в солнцестояние, либо в равноденствие и заканчивается, соответственно, в равноденствие или солнцестояние. Во всех циклах, развивающихся по 24-месячному сценарию, стагнация Е-сдвига начинается в декабре–январе, и через три месяца в первое же равноденствие (в марте–апреле) спуск в нижние слои стратосферы возобновляется. Если в первое равноденствие стагнация не закончится, то она будет продолжаться до второго равноденствия (до сентября–октября). Таким образом, полная длительность стационарного периода возрастает на шесть месяцев и составляет три сезона (30-месячный сценарий с началом в январе). В циклах, начинающихся в июле, стагнация всегда продолжается три сезона до марта–апреля следующего года. Дважды наблюдалась стадия стагнации длиной пять сезонов, которая не закончилась и во второе равноденствие и продолжалась дополнительные два сезона до третьего равноденствия (36-месячный сценарий КДЦ).

3.4. Сезонные закономерности эволюции КДЦ.

Итак, проведенное по данным наземных измерений на экваториальных широтах за период 1953–2008 гг. исследование высотных профилей скорости среднесезонального ветра стратосферы показало, что изменения вертикальной структуры ветра в квазидвухлетнем цикле демонстрируют отчетливую связь с сезонами года, которая заключается в следующем [Габис и Трошичев, 2005; Gabis and Troshichev, 2004; 2005; 2006; 2008].

1) Спуск области восточного сдвига скорости ветра из средней в нижнюю стратосферу всегда имеет стационарный период – стадию стагнации.

2) В разных КДЦ высота области стагнации может быть разной и изменяется в диапазоне от ~40 до ~20 гПа (22–26 км). При этом в каждом индивидуальном КДЦ высота Е-сдвига практически постоянна на протяжении всего периода стагнации. В течение стагнации на высотах от 10 гПа до ~(20–40) гПа наблюдается Е-ветер, а в нижней стратосфере от ~(20–40) гПа до 70 гПа наблюдается W-ветер без существенных изменений высотного распределения ветра (профиля).

3) Период стагнации всегда начинается в солнцестояние (в декабре–январе или в июне–июле). Это означает, что спуск Е-сдвига в средней стратосфере независимо от момента своего начала всегда приостанавливается вблизи солнцестояния на несколько месяцев. Возобновление спуска зоны Е-сдвига в нижнюю стратосферу после стагнации всегда начинается только около равноденствия – в марте–апреле или в сентябре–октябре. Следовательно, длительность стадии стагнации изменяется дискретно и в разных циклах может быть равна одному, трем или пяти сезонам (трем, девяти или пятнадцати месяцам, соответственно).

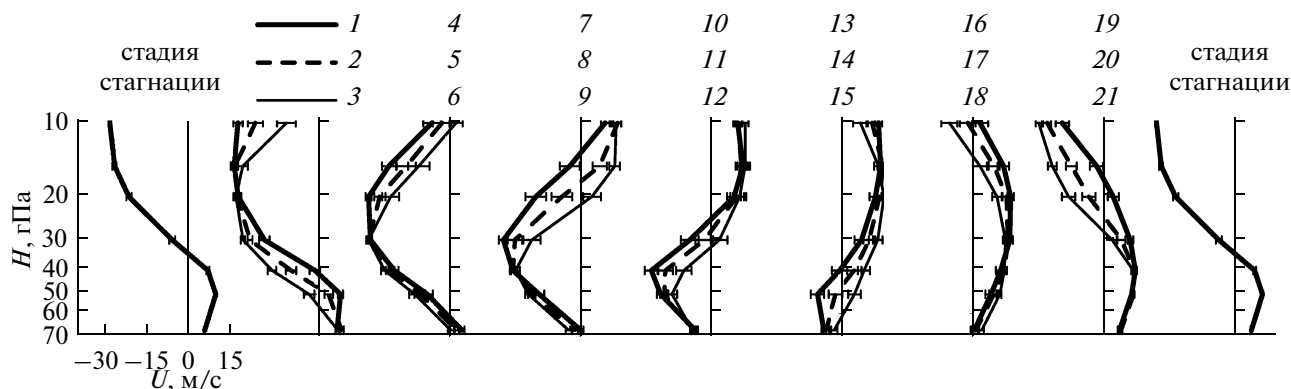


Рис. 2. Модель изменений высотных профилей скорости ветра в течение КДЦ — средние по всем циклам профили (за период 1953–2008 гг.). Числа от 1 до 21 соответствуют последовательным месяцам в течение семисезонного интервала от окончания стагнации текущего КДЦ до начала стагнации очередного КДЦ.

4) Если период КДЦ определять как интервал между начальными моментами последовательных стадий стагнации, то он должен изменяться также дискретно и быть равен кратному 6 месяцев, т.е. 24, 30 или 36 месяцам.

5) Все циклы эволюционируют по одному из трех возможных сценариев, при этом длительность стагнации и период КДЦ однозначно связаны. В 24-месячном сценарии стадия стагнации длится один сезон, в 30-месячном — три сезона, и в 36-месячном — пять сезонов.

6) Временной интервал после завершения стагнации данного КДЦ до начала нового цикла (определяемого по началу следующей стадии стагнации), во всех типах сценариев составляет семь сезонов.

4. ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ КВАЗИДВУХЛЕТНЕГО ЦИКЛА

Воспользовавшись информацией, приведенной в табл. 1, можно построить среднюю картину эволюции квазидвухлетнего цикла. Для этого следует усреднить высотные профили скорости ветра за весь период наблюдений (1953–2008 гг.), сгруппировав их в соответствии со стадиями развития КДЦ. Результаты представлены на рис. 2. Крайние профили, соответствующие стадии стагнации, были вычислены по профилям в течение этой стадии за все 24 цикла. Путем усреднения профилей за соответствующие месяцы в течение семи сезонов между окончанием и началом последовательных стадий стагнации были вычислены профили, помеченные на рис. 2 числами от 1 до 21 (показаны группами по три месяца). Горизонтальные линии с вертикальными ограничителями (bars) вдоль профилей на каждой высоте дают амплитуду ошибки при вычислении средних значений скорости.

После окончания стагнации в течение первых трех месяцев наблюдаются интенсивные изменения профилей в нижней стратосфере — происходит

спуск восточного ветра ниже ~30 гПа (профили 1–3 на рис. 2). При этом в верхних слоях начинается уменьшение интенсивности восточного ветра (профили 2–5), и через несколько месяцев ветер изменяет направление на западное на высоте 10 гПа (профиль 6). Далее в течение примерно десяти месяцев наблюдается спуск западного ветра до высоты 70 гПа (профили 6–16). В конце этого периода (профили 14–15) начинается уменьшение интенсивности западного ветра на верхних высотных уровнях, и ветер изменяет направление на восточное (профили 17–18). Спустя примерно полгода в результате смещения восточного ветра до высоты зоны стагнации ~(30–40) гПа (профили 18–21) в экваториальной стратосфере вновь наблюдается профиль скорости ветра, соответствующий периоду стагнации.

Каким бы образом не изменялась скорость ветра в ходе КДЦ, начало и окончание стагнации четко связаны с сезонами года. От окончания периода стагнации до начала следующего периода стагнации проходит семь сезонов во всех возможных сценариях эволюции КДЦ. Эти закономерности обосновывают возможность прогноза длительности квазидвухлетнего цикла.

Прогноз осуществляется путем анализа изменений высотного распределения ветра, т.е. профилей скорости за последовательные месяцы. Следует выделить стадию стагнации по главным признакам: восточный ветер над западным, высота E-сдвига в диапазоне от 40 до 20 гПа, отсутствие регулярного спуска E-сдвига. Далее определяется окончание стадии стагнации по возобновлению спуска E-сдвига в нижнюю стратосферу. На основании информации о начале и окончании стадии стагнации можно определить длительность, т.е. тип сценария текущего КДЦ. Для прогноза начала очередного КДЦ достаточно информации о времени окончания стадии стагнации текущего цикла. Начало следующего КДЦ прогнозируется через семь сезонов в соответ-

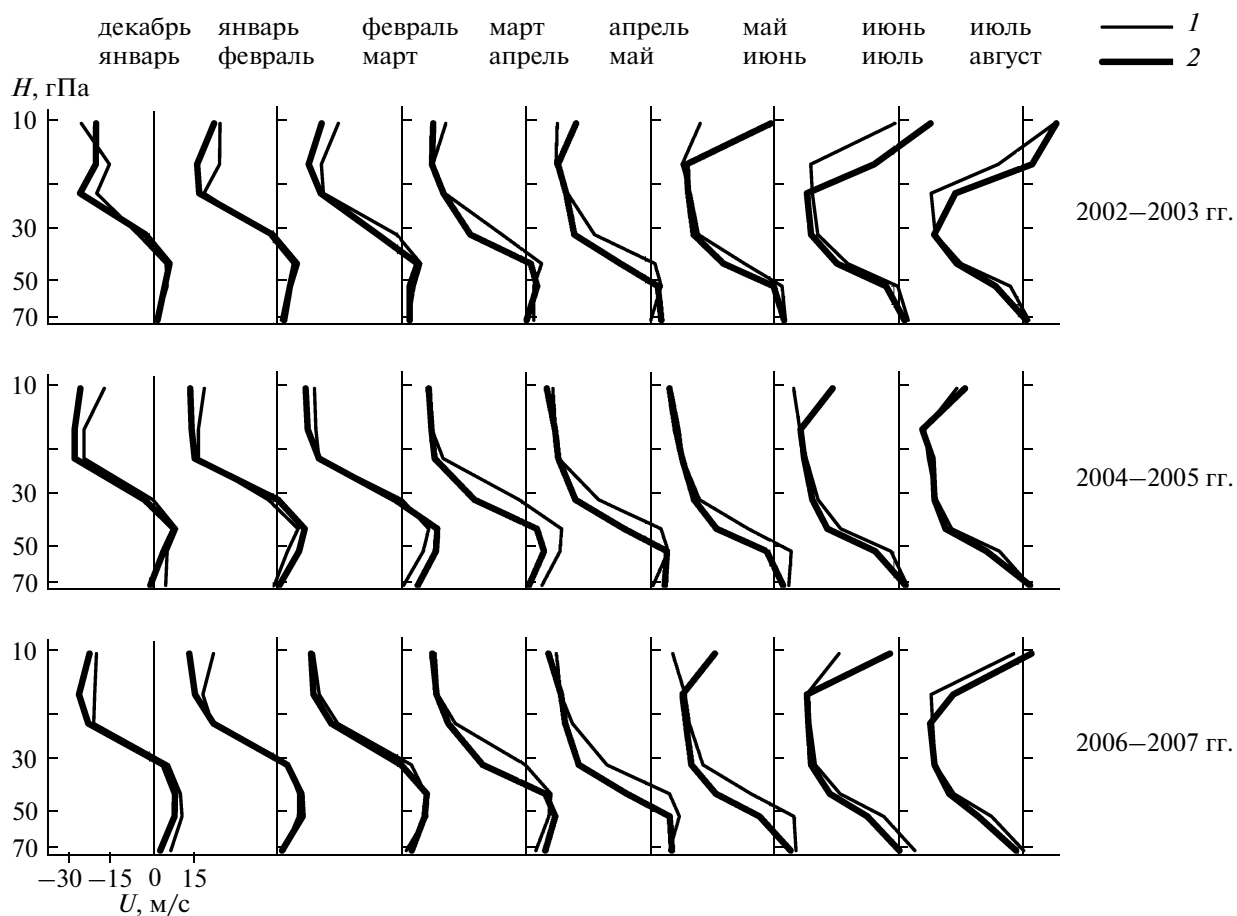


Рис. 3. Определение момента окончания периода стагнации по высотным профилям скорости в квазидвухлетних циклах № 22 (верхний ряд), № 23 (средний ряд) и № 24 (нижний ряд). 1 и 2 – предшествующий и текущий месяцы, соответственно.

ствующее солнцестояние. В пределах семисезонного интервала высотное распределение ветра может быть оценено по модельным профилям 1–21, показанным на рис. 2.

Следовательно, если в декабре или в июне в слое от 70 до $\sim(20\text{--}40)$ гПа наблюдается западный ветер, а в слое от $\sim(20\text{--}40)$ до 10 гПа – восточный ветер, то, по крайней мере, до марта следующего года высотное положение Е-сдвига скорости не будет изменяться, что соответствует стадии стагнации. Если стагнация началась в июне–июле, то в марте–апреле она завершится, ее длительность составит три сезона, и, таким образом, данный КДЦ будет развиваться по 30-месячному сценарию с началом в июле. Если же стагнация началась в декабре–январе, то после марта–апреля возможны три варианта развития КДЦ. При возобновлении спуска Е-сдвига цикл будет 24-месячным. Если спуск Е-сдвига не возобновится, то стадия стагнации продлится еще полгода до сентября–октября, и цикл будет 30-месячным. Не исключается также возможность еще более продолжительной стадии стагнации – до марта следующего года, что приведет к 36-месячному циклу.

Так как после 30-месячного цикла с началом в январе всегда следует 30-месячный цикл с началом в июле, то в данном случае возможен прогноз на срок до пяти лет. После фиксации продолжительной стадии стагнации для цикла, начавшегося в январе i -го года, можно утверждать, что стагнация текущего цикла продолжительностью три сезона завершится в сентябре–октябре i -го года, начало следующего цикла будет иметь место через семь сезонов после этого в июле $(i + 2)$ -го года. Поскольку циклы с началом в июле всегда были 30-месячными, можно ожидать начало очередного цикла через 2.5 года в январе $(i + 5)$ -го года. По крайней мере, до первого равноденствия $(i + 5)$ -го года будет наблюдаться стадия стагнации. Таким образом, от момента создания прогноза в середине i -го года до марта–апреля $(i + 5)$ -го года ежемесячные изменения высотного распределения скорости будут идти в соответствии с моделью, представленной на рис. 2.

В работе [Gabis and Troshichev, 2005] по данным о ветре по июль 2003 г. было показано, что стадия стагнации, начавшаяся в июле 2002 г., завершилась в равноденствие марта–апреля 2003 г. На рисунке 3

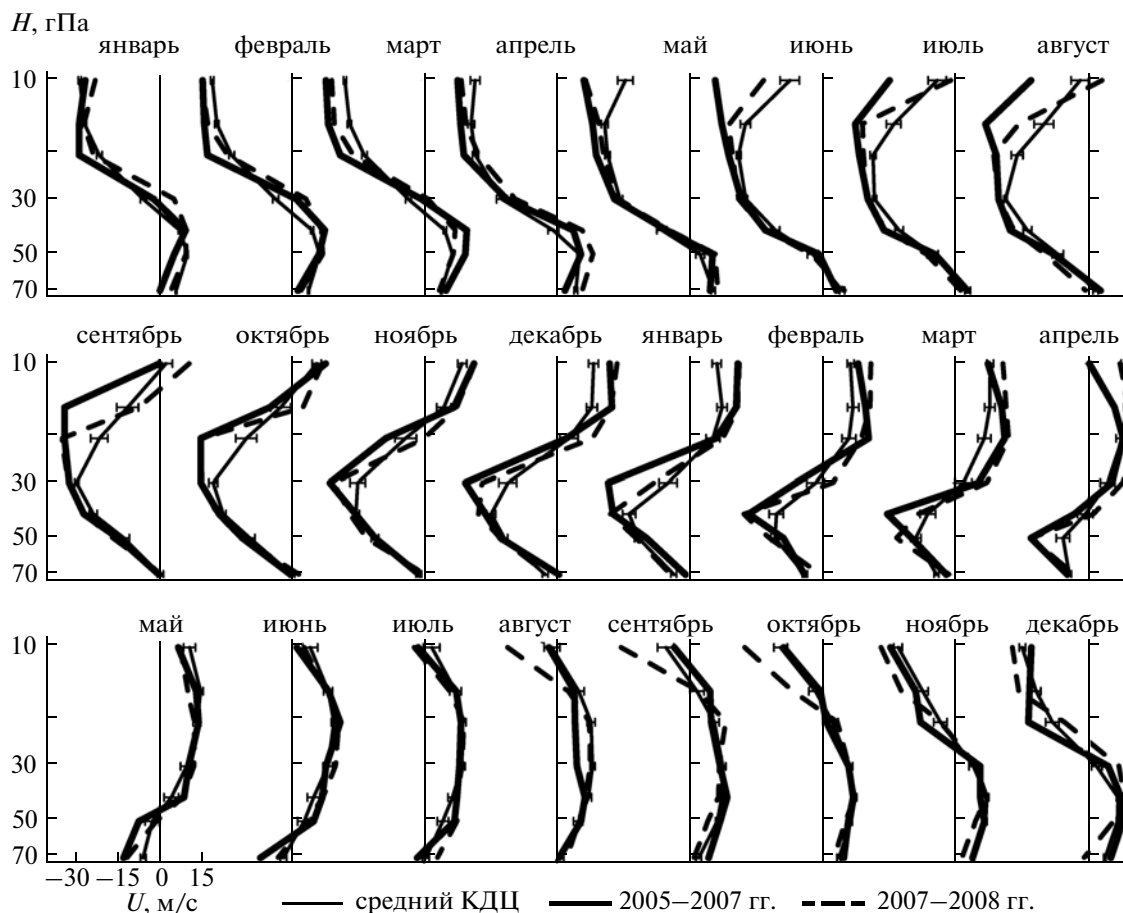


Рис. 4. Сравнение модельных профилей (среднего КДЦ) с фактически наблюдаемыми профилями зонального ветра для квазидвухлетних циклов № 23 и № 24.

в верхнем ряду представлены профили зональной скорости с декабря 2002 г. по август 2003 г. Видно, что в декабре–марте наблюдалась стагнация зоны Е-сдвига, а в марте–апреле 2003 г. восточный ветер возобновил спуск ниже ~30 гПа. Следовательно, данный цикл (№ 22 в соответствии с нумерацией в табл. 1) развивался по 30-месячному сценарию с началом в июле, что позволило сделать прогноз для начала следующего цикла (№ 23) в январе 2005 г., который полностью оправдался [Gabis and Troshichev, 2005].

Стадия стагнации очередного цикла № 23, стартовав в январе 2005 г., продолжалась до марта–апреля 2005 г., в апреле началось смещение восточного сдвига в нижние слои (рис. 3, средний ряд профилей). В работе [Gabis and Troshichev, 2006] на основании экспериментальных данных по июль 2005 г. был сделан прогноз развития текущего и начала следующего цикла. Очевидно, что, поскольку период стагнации завершился через один сезон, текущий КДЦ развивался по 24-месячному сценарию. Следовательно, через семь сезонов после марта–апреля 2005 г. в январе 2007 г. должен был начаться новый цикл № 24. Именно так и произошло, прогноз

оправдался – высотный профиль, соответствующий новому периоду стагнации, сформировался к январю 2007 г.

Как показано в работе [Gabis and Troshichev, 2008] на основании доступных данных по май 2007 г., изменения профилей скорости после марта 2007 г. свидетельствовали о возобновлении спуска восточного ветра в первое же равноденствие после начала стагнации. Следовательно, период стагнации очередного квазидвухлетнего цикла № 24 закончился в марте–апреле 2007 г. (рис. 3, нижний ряд профилей). Это означало, что текущий КДЦ является так же, как и предыдущий цикл, 24-месячным и должен завершиться к солнцестоянию декабря 2008 г. Поэтому следующий КДЦ № 25 начнется в январе 2009 г. Анализ последующих изменений высотных профилей скорости зонального ветра подтвердил справедливость сделанного прогноза.

На рисунке 4 показаны профили зонального ветра для двух последних 24-месячных циклов (№ 23 и № 24) и профили для среднего КДЦ (представленные выше на рис. 2). Профили сгруппированы по соответствующим месяцам циклов, что позволяет

сопоставить изменения высотной структуры ветра в индивидуальных циклах между собой и сравнить их с изменениями в средних профилях. Следует отметить достаточно хорошее совпадение фактически наблюдаемых профилей со средними профилями, которые могут служить основой для прогноза КДЦ. Наибольшие отличия имеют место в диапазоне высот 20–10 гПа в период уменьшения восточного ветра и начального периода спуска западного сдвига скорости (период с мая по сентябрь первого года каждого цикла). Необходимо подчеркнуть, что, несмотря на некоторые различия в скорости ветра и в высоте зон сдвига в конкретные месяцы, основные сезонные закономерности выполняются четко: стадия стагнации восточного сдвига скорости начинается в солнцестояние, заканчивается в равноденствие, и следующая стадия стагнации начинается через 21 месяц (или семь сезонов) вновь в солнцестояние.

Стадия стагнации текущего КДЦ № 25 началась в январе 2009 г. На основании данных измерений скорости ветра по май 2009 г. можно утверждать, что этот цикл будет развиваться по одному из трех возможных вариантов. Если после мая 2009 г. спуск Е-сдвига возобновится, то цикл продлится 24 месяца, и следующий КДЦ (№ 26) начнется в январе 2011 г. Если же стагнация не закончится, то цикл № 25 будет развиваться по 30-месячному сценарию и завершится только в июне 2011 г. Таким образом, очередной цикл № 26 начнется в июле 2011 г. и будет 30-месячным. Соответственно, начало цикла № 27 будет наблюдаться в январе 2014 г. В последующей работе будет подробно описан прогноз эволюции текущего цикла № 25 и, возможно, следующего КДЦ (№ 26) на основании экспериментальных данных о скорости ветра в ближайшие после мая 2009 г. месяцы.

5. ВЫВОДЫ

Зависимость многих атмосферных явлений от фазы КДЦ обуславливает необходимость прогноза эволюции КДЦ. Сезонная закономерность изменений зонального ветра в экваториальной стратосфере и вытекающая из нее дискретность периода КДЦ позволяют прогнозировать развитие КДЦ, его длительность и моменты изменения фаз цикла.

Стадия стагнации в течение спуска восточного сдвига скорости всегда начинается в солнцестояние и заканчивается в равноденствие. В разных КДЦ продолжительность стагнации различна, однако может принимать только дискретно изменяющиеся значения — один, три или пять сезонов. Длительность стадии стагнации является определяющим фактором продолжительности КДЦ. При определении периода КДЦ по интервалу между солнцестояниями, в которые начинаются последовательные стадии стагнации, оказывается, что период также

изменяется дискретно и может быть равен только 24, 30 или 36 месяцам.

Полный цикл изменений высотных профилей скорости зонального ветра в ходе каждого КДЦ укладывается в определенные временные масштабы. Фиксация окончания стадии стагнации текущего цикла однозначно определяет дату (месяц и год) начала очередного КДЦ. Сезонная закономерность эволюции КДЦ позволяет осуществлять прогноз фаз квазидвухлетнего цикла на период от двух до пяти лет в зависимости от сценария текущего КДЦ.

Авторы выражают благодарность В. Naujokat и К. Labitzke за любезно предоставленные данные о зональной скорости ветра по измерениям на экваториальных станциях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Габис И.П., Трошичев О.А. Закономерности сезонной эволюции зонального ветра экваториальной стратосферы в квазидвухлетнем цикле // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. Т. 41. № 4. С. 480–495. 2005. (English Translation: — I.P. Gabis, O.A. Troshichev. Seasonal Regularities in the Quasi-Biennial Oscillation of the Equatorial Stratospheric Zonal Wind // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. V. 41. № 4. P. 433–447. 2005.).
- Груздев А.Н., Безверхний В.А. Многолетние вариации квазидвухлетней цикличности экваториального стратосферного ветра // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. Т. 35. № 6. С. 773–785. 1999. (English Translation: — A.N. Gruzdev, V.A. Bezverkhni. Long-Term Variations in the Quasi-Biennial Oscillation of the Equatorial Stratospheric Wind // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. V. 35. № 6. P. 700. 1999.).
- Кац А.Л. Циркуляция в стратосфере и мезосфере. Л.: Гидрометеиздат, 206 с. 1968.
- Холтон Дж. Стратосфера и ее связи с тропосферой // Крупномасштабные динамические процессы в атмосфере / Ред. Б. Хоскинс, Р. Пирс. С. 306–335. М.: Мир, 432 с. 1988. (in English: — Holton, J.R. The stratosphere and its links to the troposphere // “Large-Scale Dynamical Processes in the Atmosphere” / eds. B. Hoskins and R. Pearce. London. Academic Press. 412 p. 1983.)
- Baldwin M.P., Gray L.J., Dunkerton T.J. et al. The quasi-biennial oscillation // Rev. Geophys. V. 39. № 2. P. 179–229. 2001.
- Dunkerton T.J. Annual variation of deseasonalized mean flow acceleration in the equatorial lower stratosphere // J. Met. Soc. of Japan. V. 68. № 4. P. 499–508. 1990.
- Dunkerton T.J., Delisi D.P. Climatology of the equatorial lower stratosphere // J. Atmos. Sci. V. 42. № 4. P. 376–396. 1985.
- Dunkerton T.J., Delisi D.P. Interaction of the quasi-biennial oscillation and semiannual oscillation // J. Geophys. Res. V. 102. № D22. P. 26107–26116. 1997.
- Gabis I.P., Troshichev O.A. Influence of solar UV irradiance on quasi-biennial oscillations in the Earth’s atmosphere // Adv. Space Res. V. 34. № 2. P. 355–360. 2004.

- *Gabis I.P., Troshichev O.A.* QBO cycle identified by changes in height profile of the zonal winds: new regularities // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 67. № 1–2. P. 33–44. 2005.
- *Gabis I.P., Troshichev O.A.* Influence of solar UV irradiation on quasi-biennial oscillation of zonal winds in the equatorial stratosphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 68. № 17. P. 1987–1999. 2006.
- *Gabis I., Troshichev O.* The quasi-biennial oscillations in the equatorial stratosphere: seasonal regularities, dependence on the solar UV flux and relation to ozone depletion in Antarctica // *Solar Physics Research Trends* / ed. by Pingzhi Wang. P. 165–194. New York: Nova Science Publishers, Inc. 2008.
- *Holton J.R., Lindzen R.S.* An updated theory for the quasi-biennial cycle of the tropical stratosphere // *J. Atmos. Sci.* V. 29. № 10. P. 1076–1080. 1972.
- *Holton J. R., Tan H.C.* The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 mb // *J. Atmos. Sci.* V. 37. № 10. P. 2200–2210. 1980. <http://www.geo.fu-berlin.de/en/met/ag/strat/produkte/qbo/index.html>
- *Kinnersley J.S., Pawson S.* The descent rates of the shear zones of the equatorial QBO // *J. Atmos. Sci.* V. 53. № 14. P. 1937–1949. 1996.
- *Labitzke K.* On the interannual variability of the middle stratosphere during northern winter // *J. Met. Soc. of Japan.* V. 60. № 1. P. 124–139. 1982.
- *Labitzke K.* On the signal of the 11-year sunspot cycle in the stratosphere and its modulation by the quasi-biennial oscillation // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 66. № 13–14. P. 1151–1157. 2004.
- *Labitzke K.* On the solar cycle QBO relationship: a summary // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 67. № 1–2. P. 45–54. 2005.
- *Labitzke and Collaborators*, 2002: The Berlin Stratospheric Data Series, CD from Meteorological Institute, Free University Berlin.
- *Lait L., Schoeberl M.R., Newman P.A.* Quasi-biennial modulation of the Antarctic ozone depletion // *J. Geophys. Res.* V. 94. № D9. P. 11559–11571. 1989.
- *Logan J.A., Jones D.B.A., Megretskaya I.A., Oltmans S.J., Johnson B.J., Vomel H., Randel W.J., Kimani W., Schmidlin F.J.* Quasi-biennial oscillation in tropical ozone as revealed by ozonesonde and satellite data // *J. Geophys. Res.* V. 108. № D8. doi:10.1029/2002JD002170, 2003.
- *Naujokat B.* An Update of the Observed Quasi-biennial Oscillation of the Stratospheric Winds over the Tropics // *J. Atmos. Sci.* V. 43. P. 1873–1877. 1986.
- *Oltmans S.J., London J.* The quasi-biennial oscillation in atmospheric ozone // *J. Geophys. Res.* V. 87. № 11. P. 8981–8989. 1982.
- *Wallace J.M., Panetta R.L., Estberg J.* Representation of the equatorial stratospheric quasi-biennial oscillation in EOF phase space // *J. Atmos. Sci.* V. 50. № 12. P. 1751–1762. 1993.
- *Wang R., Fraedrich K.* Phase-space characteristics of the tropical stratospheric quasi-biennial oscillation // *J. Atmos. Sci.* V. 52. № 24. P. 4482–4500. 1995.