

УДК 551.511.3;551.511.31;551.558.21;551.513.27

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОЙ МЕРИДИОНАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В РАЗНЫЕ ФАЗЫ КВАЗИДВУХЛЕТНЕГО КОЛЕБАНИЯ

© 2022 г. А. В. Коваль^{a, b, *}, Н. М. Гаврилов^{a, **}, А. И. Погорельцев^{a, b, ***}, М. М. Ефимов^a

^aСанкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб., 7–9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

^bРоссийский государственный гидрометеорологический университет,
Воронежская ул., 79, Санкт-Петербург, 192007 Россия

*e-mail: a.v.koval@spbu.ru

**e-mail: n.gavrilov@spbu.ru

***e-mail: apogor@rshu.ru

Поступила в редакцию 23.06.2021 г.

После доработки 17.09.2021 г.

Принята к публикации 07.10.2021 г.

Изучена чувствительность остаточной меридиональной циркуляции (ОМЦ) в средней и верхней атмосфере к изменению фазы квазидвухлетнего колебания (КДК) низкоширотного зонального ветра в стратосфере. Для расчета ОМЦ используются поля ветра и температуры, полученные с использованием нелинейной модели общей циркуляции средней и верхней атмосферы МСВА. Впервые показаны статистически значимые результаты, иллюстрирующие изменение индуцированных волнами вихревых потоков во внетропической страто-мезосфере в разные фазы КДК. В частности, продемонстрировано общее ослабление вихревой циркуляции в северном полушарии при западной фазе КДК, за исключением области, расположенной в средних широтах, в интервале высот 50–60 км. Исследование чувствительности ОМЦ к изменению фаз КДК помогает лучше понять особенности динамического взаимодействия между тропическими и внетропическими широтами, а также различными слоями атмосферы, влияющими на циркуляционный перенос и перемешивание долгоживущих атмосферных компонент.

Ключевые слова: численное моделирование, остаточная меридиональная циркуляция, квазидвухлетнее колебание

DOI: 10.31857/S0002351522010059

1. ВВЕДЕНИЕ

Циркуляционный перенос газовых примесей между средней атмосферой и тропосферой оказывает влияние на общее распределение климатически активных атмосферных газовых составляющих. Основным механизмом глобального переноса консервативных примесей (см., например, [1]) между стратосферной и тропосферой является меридиональная циркуляция Брюера–Добсона (ЦБД) [2, 3], связанная с глобальным переносом массы, при котором тропосферный воздух входит в стратосферу в тропиках, затем перемещается к полюсам и опускается вниз в средних и высоких широтах. На высотах мезосферы принято рассматривать мезосферную меридиональную циркуляцию, подразумевающую перенос массы из летнего полушария в зимнее [4].

Известно, что при рассмотрении “эйлеровой” средней меридиональной циркуляции, т.е. при зональном осреднении меридионального и вертикального циркуляционных потоков, при усло-

вии стационарности и горизонтальной однородности гидродинамических полей, в уравнениях динамики происходит компенсация вихревых потоков импульса и тепла адвективными потоками импульса и тепла [5]. Это свойство не позволяет выделить и диагностировать непосредственное волновое воздействие на средний поток. Компенсация волновых и средних течений при эйлеровском подходе происходит и в уравнении неразрывности для долгоживущих газовых составляющих, и, таким образом, применение эйлеровой средней меридиональной циркуляции неэффективно для вычисления их переноса [6].

С целью преодоления указанного недостатка принято использовать альтернативные подходы к анализу зонально-осредненной циркуляции, такие как неадиабатическая циркуляция (“mass (diabatic) circulation” [7]), преобразованная эйлерова средняя циркуляция (“Transformed Eulerian Mean” [8]), Лагранжева циркуляция (“Lagrangian-Mean” [9]) и др. В данном исследовании

использован подход в терминах преобразованной эйлеровой средней циркуляции, впервые введенный в исследовании [8], который обеспечивает эффективную диагностику волнового воздействия на средний поток, а также позволяет произвести оценку процессов переноса газовых примесей в меридиональной плоскости. Он основан на рассмотрении средней остаточной меридиональной циркуляции (ОМЦ), представляющей собой комбинацию вихревого и адвективного среднего переноса. Рассчитанная при помощи такого подхода остаточная циркуляция позволяет оценить ту часть среднего потока, вклад которой в адиабатическое изменение температуры воздуха не компенсируется дивергенцией индуцированного волной потока тепла [10]. Атмосферные движения в рамках ОМЦ на средних и высоких широтах имеют сильный сезонный цикл с большими межполушарными различиями. Так, для анализа структуры ОМЦ были введены такие понятия, как “тропический апвеллинг” и “внетропический даунвеллинг” (tropical upwelling/extratropical downwelling) в стратосфере, представляющие собой интегральный поток массы в нижней стратосфере и характеризующие общую силу ОМЦ (например, [11–13]). Причем границы области тропического апвеллинга в нижней стратосфере, т.е. широты, на которых вертикальная остаточная скорость меняет знак с положительного на отрицательный, определяются как “разворотные широты” (turnaround latitudes [14]). В сезоны солнцестояния область тропического апвеллинга перемещается в сторону летнего полушария (см, например, рис. 4а в [15]).

Квазидвухлетнее колебание (КДК) экваториального зонального ветра является одной из важных особенностей динамики средней атмосферы (например, [16, 17]). С периодичностью порядка двух лет направление зонального ветра меняется на противоположное. Период КДК варьируется от 22 до 34 мес. при среднем значении 28 месяцев. Наибольшие скорости зонального ветра достигаются на высотах 20–30 км — около 20 м/с для зонального ветра, направленного на восток и около –30 м/с — на запад. При этом, граница между восточным и западным ветром со временем опускается со скоростью ~1 км/мес. Хотя КДК является динамическим процессом, происходящим в стратосфере вблизи экватора, его влияние в виде квазидвухлетней периодичности наблюдается во всех гидродинамических полях на всех широтах и высотах [16, 18]. В исследовании [19] получен вывод, что эффект КДК на высоких широтах может быть связан с индуцированными изменениями в термическом сбалансированной субтропической струе и связанным с этим показателем преломления, который ограничивает распространение волн России в субтропиках, усиливая волновую активность и глобальную меридиональную циркуляцию.

В данной работе производится моделирование общей атмосферной циркуляции для января при восточной и западной фазах КДК. На основе полей ветра и температуры рассчитываются вертикальная и меридиональная компоненты ОМЦ, а также разности компонент ОМЦ между фазами КДК, интерпретируемые как результат динамического воздействия КДК на остаточную циркуляцию. Подробное изучение воздействия КДК на остаточную циркуляцию, в частности, на индуцированный планетарными волнами вихревой вклад в меридиональную циркуляцию, до высот нижней термосферы (до 100 км) с получением статистически достоверных результатов проводится впервые. Рассмотрение эйлеровой средней и остаточной меридиональной циркуляции позволяет оценить как общий циркуляционный перенос атмосферных газов, так и вклад в этот перенос волновых процессов в средней и верхней атмосфере.

2. МЕТОДОЛОГИЯ

С целью исследования динамического воздействия КДК в атмосфере, при моделировании общей циркуляции атмосферы в данном исследовании используется 3-мерная нелинейная механическая численная модель общей циркуляции средней и верхней атмосферы “МСВА” [20, 21], одна из наиболее активно развиваемых в последние годы в России моделей волновой атмосферной динамики (см., например, [22–26] и ссылки в них). Модель МСВА основана на стандартной системе примитивных уравнений в сферической системе координат [27]. Основные рассчитываемые моделью параметры включают зональную, меридиональную, и вертикальную компоненты скорости, геопотенциал и температуру. Шаги горизонтальной сетки модели составляют 5.625° по долготе и 5° по широте. Вертикальная сетка модели представляет собой log-изобарическую координату $z = -H \ln(p/p_0)$, где p_0 — приземное давление и $H = 7$ км. Используется версия модели с 48 уровнями по высоте, соответствующими высотному диапазону от поверхности Земли до 135 км. Шаг интегрирования по времени составляет 450 с. Модель МСВА может воспроизводить квази-стационарные и распространяющиеся на восток и запад планетарные волны с периодами 2–16 сут [28]. МСВА также включает параметризацию динамических и тепловых эффектов гравитационных волн неорографического происхождения [29, 30]. Для учета теплового и динамического воздействия мезомасштабных орографических волн в модели МСВА используется параметризация орографических волн, разработанная Гавриловым и Ковалем [31]. Распространение ОГВ в диссипативную вертикально неоднородную атмосферу приводит к обмену энергией между фоно-

вым потоком и волнами, а также, к нагреву атмосферы за счет диссипации энергии волн. Для расчета полного потока волновой энергии, F_E , волнового ускорения $a_{w\xi}$ вдоль оси ξ , направленной вдоль горизонтального волнового вектора \mathbf{m} и полной скорости теплового воздействия, ε_w , создаваемых стационарными ОГВ с наблюдаемыми частотами $\sigma = 0$, Гаврилов и Коваль [31] получили поляризационные соотношения, принимая во внимание вращение атмосферы, и получили следующие выражения:

$$\begin{aligned} F_E &= -\frac{\bar{\rho} f^2 U^2}{2mk\bar{v}_\xi}; \quad k^2 = \frac{N^2}{\bar{v}_\xi^2} \left(1 - \frac{f^2}{m^2 \bar{v}_\xi^2}\right)^{-1}, \\ a_{w\xi} &= -\frac{k^2 U^2}{2\bar{v}_\xi} (v + K_z) \left(1 + \frac{1}{(\gamma - 1) \text{Pr}}\right), \\ \varepsilon_w &= (v + K_z) \delta k^2 U^2, \quad \delta = \frac{f^2}{m^2} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \bar{v}_\xi^2}{\partial z}\right)^{-1}, \end{aligned} \quad (1)$$

где v и K_z – коэффициенты кинематической и турбулентной вязкости; m и k – горизонтальное и вертикальное волновые числа; \bar{v}_ξ – скорость верта вдоль оси ξ ; ρ – плотность атмосферы; f – параметр Кориолиса; Pr – эффективное число Прандтля; N – частота Брента–Вяйсяля; $\gamma = c_p/c_v$ – отношение теплоемкостей, δ – коэффициент, зависящий от вертикального градиента средней горизонтальной скорости [31]. Рассчитанные притоки тепла, создаваемые ОГВ, добавляются в уравнение притока тепла МСВА, а зональная и меридиональная компоненты волнового ускорения – в уравнения МСВА для соответствующих составляющих скорости. Используемая параметризация ОГВ, позволяет наиболее точно, по сравнению с существующими аналогами, обзор которых представлен в [32], рассчитывать энергетические и динамические вклады ОГВ с учетом вращения атмосферы.

С подробным описанием учитываемых в актуальной версии модели процессов и схемой численного эксперимента можно ознакомиться в [26].

Учет различных фаз КДК в МСВА. Чтобы воспроизвести КДК в модели МСВА, Погорельцев с соавторами [28] предложили использовать дополнительное слагаемое в уравнении импульса для зонального ветра, которое пропорционально разнице между рассчитанными и наблюдаемыми зонально-осредненными величинами на широтах между 17.5° ю.ш. и 17.5° с.ш. и высотах от 0 до 50 км. На основе рассмотрения данных реанализа Метеорологической службы Великобритании (UK Met Office [33]) были выбраны отдельные годы с западными и восточными фазами КДК, и вычислены средние зонально-осредненные распределения зонального ветра и температуры для обеих

фаз КДК. В работе [34] показано, что данных за десять лет достаточно, чтобы зафиксировать достоверную климатологию метеорологических полей. Поля температуры и геопотенциала, полученные с использованием данных реанализа метеорологической информации UK Met Office и осредненные по выбранным годам, используются в МСВА при инициализации модели для воспроизведения соответствующих фаз КДК.

Ансамбли расчетов МСВА. Относительно небольшие изменения начальных условий могут оказать существенное влияние на эволюцию моделируемой стратосферы [35]. Так, малые вариации в структуре и амплитуде планетарных волн в нелинейной модели влекут за собой изменения среднего потока, влияющие на условия распространения этих волн. В результате, после достаточно длительного интегрирования по времени, стратосферная динамика проявляет существенную изменчивость и для достижения статистической значимости модельных расчетов необходимы ансамблевые расчеты общей атмосферной циркуляции.

В модели МСВА, ансамбли формируются из отдельных расчетов (прогонов) МСВА, соответствующих разным фазам вращающийся среднего ветра и ПВ в средней атмосфере [36]. Эти фазы в МСВА контролируются изменением даты включения суточных вариаций солнечного нагрева и генерации нормальных атмосферных мод [21]. Начальные и фоновые условия для всех модельных расчетов берутся идентичными.

С целью изучения изменений остаточной циркуляции в разные фазы КДК, были использованы ансамбли из 12 пар расчетов модели МСВА для условий, характерных для восточной и западной фаз КДК. Для статистической обработки данных ансамблей используется разработанный автором пакет программ [23], который использует стандартные критерии и позволяет в автоматическом режиме определить минимально необходимый объем ансамбля, при котором достигается 95% уровень значимости ненулевой разности между величинами, рассчитанными для разных фаз КДК.

Остаточная циркуляция в данном исследовании понимается в контексте преобразованной эйлеровой средней циркуляции [8]. Меридиональную и вертикальную компоненты остаточной средней циркуляции можно получить по стандартным формулам [8], которые после ряда преобразований приведены к виду, удобному для использования при обработке моделируемых полей ветра и температуры в МСВА:

$$\bar{v}^* = \bar{v} - \frac{1}{\partial \bar{\theta} / \partial z} \left(-\frac{\overline{v' \theta'}}{H} + \frac{\partial \overline{v' \theta'}}{\partial z} - \frac{\overline{v' \theta'}}{\partial \bar{\theta} / \partial z} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

$$\bar{w}^* = \bar{w} + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{1}{\partial \bar{\theta} / \partial z} \times \left(-\sin \varphi \overline{v' \theta'} + \cos \varphi \left(\frac{\partial v' \theta'}{\partial \varphi} - \frac{v' \theta'}{\partial \bar{\theta} / \partial z} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial z \partial \varphi} \right) \right). \quad (3)$$

Здесь черта сверху обозначает зонально осредненные величины, штрихи – отклонения величин от зонально-осредненных значений; v и w – меридиональный и вертикальный ветер; θ – потенциальная температура; φ – широта; a – радиус Земли.

В отличие от средней эйлеровой циркуляции остаточная вертикальная скорость для осредненных по времени условий пропорциональна результирующей скорости неадиабатического нагрева. Ее можно трактовать, как неадиабатическую циркуляцию в меридиональной плоскости [10], то есть циркуляцию, при которой происходит нагрев поднимающегося объема воздуха и охлаждение опускающегося, и при этом их потенциальная температура приспособляется к локальной среде. Таким образом, осредненная по времени остаточная меридиональная циркуляция аппроксимирует среднее движение воздушных масс и, следовательно, в отличие от обычной средней эйлеровой циркуляции представляет собой аппроксимацию среднего адвективного перемещения газовых составляющих. В предыдущих публикациях авторов [22, 26] показано, что рассчитанная при помощи рассмотренного подхода ОМЦ на базе ансамблей расчетов МСВА хорошо согласуется по структуре и величине с меридиональной циркуляцией, рассчитанной по данным наблюдений или ассимилированным данным.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1а представлено широтно-высотное распределение компонент ОМЦ для восточной фазы КДК, рассчитанных по формулам (2) и (3) на основе полей ветра и температуры для января месяца, полученных из ансамблевых расчетов МСВА. В мезосфере, выше 50–60 км, различима глобальная меридиональная ячейка циркуляции с восходящим потоком в высоких и средних широтах летнего (южного) полушария и нисходящим движением воздушных масс в зимнем (северном) полушарии. В стратосфере можно видеть глубокую ветвь циркуляции Брюэра–Добсона, представляющую собой тропический апвеллинг и внетропический даунвеллинг, при этом, в северном полушарии ячейка циркуляции значительно сильнее, чем в южном [6].

В целом, распределения компонент ОМЦ, аналогичные приведенным на рис. 1а, соответствуют полученным в работе [37], рассчитанным на основе данных модели общей циркуляции

СМАМ (Canadian Middle Atmosphere Model). Помимо модельных данных, для анализа остаточной меридиональной циркуляции использовались данные наблюдений с помощью микроволнового контура (MLS) на борту спутника исследования верхней атмосферы (UARS): так, в работе [38] представлены распределения вертикальной и меридиональной компонент остаточной циркуляции, которые также согласуются с рассчитанными нами данными. Хорошее соответствие с данными, представленными на рис. 1а, также было получено в [39], где представлены поля ОМЦ для зимних месяцев в северном полушарии, рассчитанные на базе спутниковых данных LIMS (Limb Infrared Monitor of the Stratosphere на спутнике Nimbus-7).

На рис. 1б представлены разности меридиональной и вертикальной компонент ОМЦ между годами с западной и восточной фазами КДК, соответствующие распределениям на рис. 1а. На обоих рисунках видны существенные положительные и отрицательные разности в экваториальной области на высотах 30–60 км, которые соответствует значительным (до 40%) изменениям ОМЦ.

Усиление циркумполярного вихря в высокоширотной северной стратосфере, наблюдаемое при западной фазе КДК [16], в уравнении движения МСВА способствует направленным на юг (отрицательным) ускорениям меридиональной циркуляции, замедляющим положительную остаточную меридиональную скорость в соответствующих областях на левом рис. 1б, что в свою очередь взаимосвязано с ослаблением нисходящей компоненты ОМЦ в высоких северных широтах на правом рис. 1б. Сходные результаты в нижней стратосфере были получены в исследовании [16], которые проанализировали реакцию внетропической циркуляции на КДК и показали, что она особенно сильна в течение северной зимы, когда направленное на восток среднее струйное течение слабее во время восточной фазы КДК, чем во время западной. На высотах мезосферы/нижней термосферы (МНТ области) видно общее ослабление компонент ОМЦ при западной фазе КДК, кроме небольшой области на средних северных широтах, выше 80 км.

Главные изменения зональной скорости при КДК происходят в низкоширотной стратосфере [25]. В этой области КДК может модифицировать волноводы, по которым распространяются ПВ. Эти ПВ распространяются в средние и высокие широты и в верхние слои атмосферы, где могут взаимодействовать с атмосферной циркуляцией, распространяя таким образом эффект от КДК в другие слои и области атмосферы. Существенное влияние на структуру циркуляции средней атмосферы оказывают в зимний период и внезапные стратосферные потепления (ВСП) [40]: при запад-

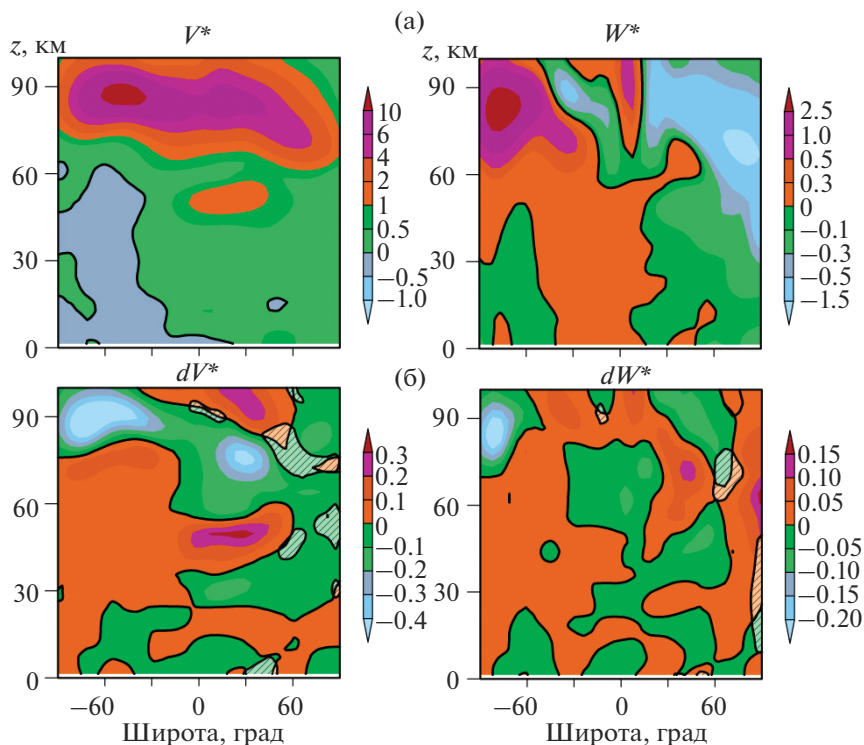


Рис. 1. Широтно-высотные распределения меридиональной (в м/с, слева) и вертикальной (в см/с, справа) компонент ОМЦ, для восточной фазы КДК в январе; б: приращения соответствующих компонент за счет перехода от восточной к западной фазе КДК. Сплошные линии показывают нулевые значения, заштрихованные области – недостоверные данные.

ной фазе КДК циркумполярный вихрь сильнее и менее возмущен, что приводит к уменьшению количества событий ВСП [18]. Такое поведение воспроизводится и в МСВА: из 12 расчетов, формирующих ансамбли, ВСП наблюдалось в течение января при восточной фазе 10 раз и 7 раз – при западной. С целью оценки статистической значимости рассчитанных приращений ОМЦ на рис. 1б, была проведена проверка гипотезы об их отличии от нуля с использованием подхода на основе парного *t*-критерия Стьюдента [23]. Среднемесячные значения приращений компонент ОМЦ на каждой широте и высоте в модели МСВА получены осреднением по $180 \times 12 = 2160$ (4-часовые данные за месяц, ансамбль из 12 прогонов МСВА) разностей пар модельных полей в каждом узле сетки. Области, со статистически недостоверными приращениями на уровне значимости 95%, обозначены штриховкой.

Ранее, изучение изменений ОМЦ в разные фазы КДК проводилось на основе обработки базы данных ассимиляции метеорологической информации UK Met Office [33]. В частности, в работе [41], рис. 5 представлены приращения ОМЦ, которые, с точностью до множителя “-1” (т.к. в работе приводятся разности “восточная – западная” фаза) имеют сходную структуру с распределения-

ми, рассчитанными в данной работе. В предыдущих работах [42] было также показано, что воздействие на ОМЦ со стороны планетарных волн усиливается при восточной фазе КДК, что способствует ускорению ОМЦ в стратосфере. Это подтверждают и наши расчеты, показавшие, в частности, существенное ослабление амплитуды стационарной планетарной волны с зональным числом 1 (СПВ1) в средне- и высокоширотной стратосфере северного полушария при западной фазе, сопровождающееся усилением циркумполярного вихря, что согласуется с теорией (например, [4]). Схожие тенденции изменений остаточной циркуляции при разных фазах КДК представлены в [43].

С целью более детального анализа изменений ОМЦ в стратосфере, мы рассмотрели меридиональные и вертикальные компоненты ОМЦ, осредненные по различным широтным интервалам (рис. 2). Весь диапазон широт был разделен на три промежутка между точками разворота: широтами, где стратосферный остаточный вертикальный ветер меняет свой знак. В классических работах (например, [14]) при исследовании меридиональной циркуляции в тропосфере и нижней стратосфере, точки разворота принято рассматривать на высоте 70 гПа. В нашем исследовании, посвященном

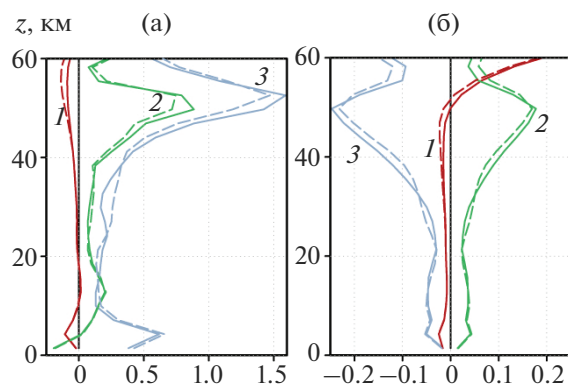


Рис. 2. Меридиональная (а, м/с) и вертикальная (б, см/с) остаточная скорость по широтным поясам 90° ю.ш.– 50° ю.ш., 50° ю.ш.– 15° с.ш. и 15° с.ш.– 90° с.ш. (линии 1–3 соответственно) за январь по данным МСВА. Пунктирные и сплошные линии соответствуют восточной и западной фазам КДК.

средней и верхней стратосфере, точки разворота рассчитываются в высотном интервале 10–50 км. Используя этот подход, мы получили область тропического стратосферного апвеллинга между 50° ю.ш. и 15° с.ш. (линии, обозначенные цифрой 2 на рис. 2б) и внетропический даунвеллинг к полюсам от этих широт (линии 1 и 3).

Указанные выше вертикальные потоки продемонстрированы на рис. 2б. Если сравнивать сплошные и пунктирные линии, соответствующие восточной и западной фазам КДК, то заметны рассмотренные нами изменения ОМЦ в интервале 20–30 км, где наблюдается ослабление циркуляции в зоне апвеллинга и даунвеллинга при западной фазе КДК по сравнению с восточной фазой. Соответствующие изменения меридиональной компоненты ОМЦ представлены на рис. 2а. В диапазоне 50–60 км наблюдается противоположный эффект – усиление ОМЦ при западной фазе.

Индукцированная волнами вихревая циркуляция. Разности между остаточными и эйлеровыми компонентами меридиональной скорости описывают так называемую вихревую циркуляцию, которая описывает вклад в незональные движения, создаваемые в основном приливами и планетарными волнами [4]. На рис. 3а показаны меридиональная и вертикальная составляющие вихревой циркуляции при восточной фазе КДК. На правой панели рисунка 3а показано, что атмосферные волны создают сильные восходящие потоки в средних широтах северного полушария, которые формируют направленный к полюсу меридиональный ветер в высоких широтах с максимумом на высотах 40–50 км на левом рис. 3а, а также нисходящие потоки вблизи северного полюса на правом рис. 3а. Это согласуется с существующей теорией [4, 6], показывающей, что области вихревых потоков создаются СПВ,

распространяющимися вверх из северной тропосферы вдоль волноводов (например, [44]). Эти волноводы расположены в северной (зимней) стратосфере, что способствует распространению СПВ на этих высотах и возникновению значительной вихревой циркуляции. Этот вихревой вклад в целом направлен навстречу средней эйлеровской циркуляции в стратосфере, и в ее сторону в области МНТ [45]. Пиковые значения вихревых компонент на рис. 3а могут существенно превышать компоненты остаточной циркуляции на соответствующих графиках на рис. 1а. Это подтверждает выводы о значительной компенсации вихревых компонент среднезональной эйлеровой циркуляцией.

Правая часть рис. 3б показывает, что при западной фазе КДК происходит увеличение скорости восходящего вихря на средних северных широтах на высотах 40–50 км. Это вызывает положительные приращения меридиональной компоненты на левом рис. 3б на широтах ниже 60° с.ш. и соответствующих высот. На высоких широтах на рис. 3б наблюдается ослабление нисходящей вихревой компоненты при западной фазе КДК, что сопровождается ослаблением и меридиональной компоненты в этой области. В целом, эти процессы способствуют ослаблению ОМЦ на рис. 1б при западной фазе КДК. В южной (летней) страто-мезосфере СПВ не распространяются (см., например, [25]), и общая структура вихревой составляющей циркуляции отражает структуру волноводов СПВ. На высотах более 50 км эти волноводы пересекают экватор и могут распространяться в южное полушарие. Это подтверждает гипотезы, что распространение СПВ из северной зимней стратосферы по волноводам, простирающимся до летнего полушария на высотах более 50–60 км, может изменять вихревую и остаточную циркуляцию в области МНТ южного полушария.

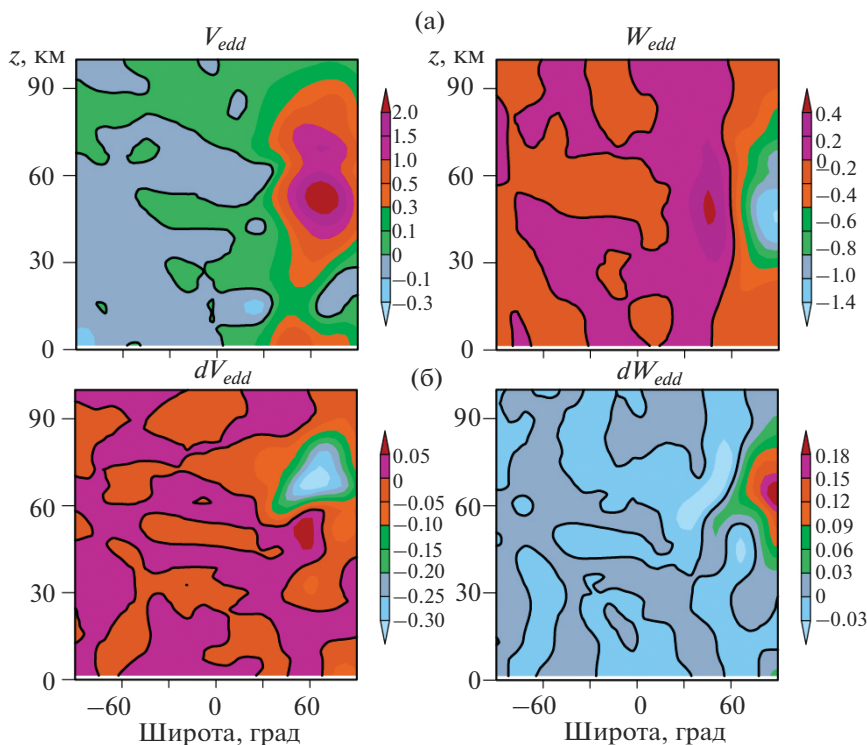


Рис. 3. То же, что на рис. 1, но для индуцированной волной вихревой циркуляции.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью диагностики волнового воздействия на средний поток, а также для обеспечения возможности расчета переноса газовых примесей в меридиональной плоскости, в данном исследовании используется подход в рамках расчета преобразованной эйлеровой средней циркуляции. Он основан на рассмотрении так называемой средней остаточной меридиональной циркуляции (ОМЦ), представляющей собой сумму вихревого и адвективного среднего переноса. Осредненная по времени остаточная меридиональная циркуляция аппроксимирует результирующее движение воздушных масс и, в отличие от обычной средней эйлеровой циркуляции, представляет собой удобный инструмент для оценки переноса консервативных примесей в атмосфере.

В качестве исходных полей ветра и температуры для расчета ОМЦ используются результаты ансамблевый расчетов общей атмосферной циркуляции с помощью модели МСВА для начальных и фоновых условий, соответствующих восточной и западной фазам КДК.

Результаты численных экспериментов показали существенную чувствительность ОМЦ к изменению фазы КДК как в тропической, так и во внетропической областях атмосферы. Различия в меридиональной и вертикальной остаточных скоростях могут достигать до 30–40%. При этом,

ослабление восходящей и нисходящей ветвей ОМЦ в средней стратосфере при западной фазе сопровождается их усилением в верхней стратосфере, которые связаны с локальным усилением вихревой циркуляции в этой области. В южном полушарии изменение ОМЦ наблюдается только на высотах МНТ области, что обусловлено особенностями распространения СПВ в летнем полушарии, оказывающих основное влияние на структуру вихревой циркуляции.

Общая структура вихревой составляющей циркуляции отражает структуру волноводов СПВ. При этом пиковые значения вихревых компонент меридиональной циркуляции могут существенно превышать компоненты остаточной циркуляции в соответствующих областях атмосферы, что свидетельствует о значительной компенсации вихревых течений среднезональной эйлеровой циркуляцией. При западной фазе КДК происходит усиление вихревой циркуляции на средних северных широтах в диапазоне 40–50 км и общее ее ослабление в других областях северного полушария, что объясняется ослаблением волновой активности СПВ в средних и высоких северных широтах и усилением циркумполярного вихря.

Благодарности. Моделирование общей циркуляции, статистическая обработка данных ансамблей и расчет остаточной меридиональной циркуляции выполнен при поддержке Российского научного фонда (грант № 20-77-10006). Модер-

низация параметризации ОГВ в модели МСВА сделана в Лаборатории исследований озонового слоя и верхней атмосферы СПбГУ при поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 075-15-2021-583).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fishman J., Crutzen P. J.* The origin of ozone in the troposphere // *Nature*. 1978. V. 274. P. 855–857.
2. *Dobson G.M.B., Harrison D.N., Lawrence J.* Measurements of the amount of ozone in the Earth's atmosphere and its relation to other geophysical conditions // *Proc. R. Soc.*, 1929. A122. 456–486.
3. *Brewer A.W.* Evidence for a world circulation provided by measurements of helium and water vapour distribution in the stratosphere // *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1949. V. 75. 351–363.
<https://doi.org/10.1002/qj.49707532603>
4. *Holton J.R.* The dynamic meteorology of the stratosphere and mesosphere // *Meteorol. Monogr.* 1975. V. 15(37). P. 1–218.
5. *Charney J.G., Drazin P.G.* Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1961. V. 66. P. 83–109.
6. *Butchart N.* The Brewer-Dobson circulation // *Rev. Geophys.* 2014. V. 52. P. 157–184.
<https://doi.org/10.1002/2013RG000448>
7. *Murgatroyd R.J., Singleton F.* Possible meridional circulations in the stratosphere and mesosphere // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 1961. V. 87. P. 125–135.
<https://doi.org/10.1002/qj.49708737202>
8. *Andrews D.G., McIntyre M.E.* Planetary waves in horizontal and vertical shear: The generalized Eliassen-Palm relation and the mean zonal acceleration // *J. Atmos. Sci.* 1976. V. 33. P. 2031–2048.
9. *Andrews D.G., McIntyre M.E.* An exact theory of non-linear waves on a Lagrangian mean flow // *J. Fluid Mech.* 1978. V. 89. P. 609–646.
10. *Shepherd T.G.* Transport in the middle atmosphere // *J. Meteor. Soc. Japan*. 2007. 85B. P. 165–191.
11. *Butchart N., Scaife A. A.* Removal of chlorofluorocarbons by increased mass exchange between stratosphere and troposphere in a changing climate // *Nature*. 2001. V. 410. P. 799–802.
<https://doi.org/10.1038/35071047>
12. *McLandress C., Shepherd T.G.* Simulated anthropogenic changes in the Brewer-Dobson circulation, including its extension to high latitudes // *J. Clim.* 2009. V. 22. P. 1516–1540.
<https://doi.org/10.1175/2008JCLI2679.1>
13. *Oberländer S., Langematz U., Meul S.* Unraveling impact factors for future changes in the Brewer-Dobson circulation // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2013. V. 118. P. 10296–10312.
<https://doi.org/10.1002/jgrd.50775>
14. *Rosenlof K.H.* Seasonal cycle of the residual mean meridional circulation in the stratosphere // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100(D3). P. 5173–5191.
<https://doi.org/10.1029/94JD03122>
15. *Seviour W.J.M., Butchart N., Hardiman S.C.* The Brewer-Dobson circulation inferred from ERA-Interim // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2012. V. 138. P. 878–888.
<https://doi.org/10.1002/qj.966>
16. *Holton J.R., Tan H.* The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 mb // *J. Atmos. Sci.* 1980. V. 37. P. 2200–2208.
17. *Baldwin M.P., Gray L.J., Dunkerton T.J., Hamilton K., Haynes P.H., Randel W.J., Holton J.R., Alexander M.J., Hirota I., Horinouchi T., Jones D.B.A., Kinnerson J.S., Marquardt C., Sato K., Takahashi M.* The quasi-biennial oscillation // *Rev. Geophys.* 2001. V. 39(2). P. 179–229.
18. *Hansen F., Matthes K., Petrick C., Wang W.* The influence of natural and anthropogenic factors on major stratospheric sudden warmings // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2014. V. 119. P. 8117–8136.
<https://doi.org/10.1002/2013JD021397>
19. *Garfinkel C.I., Butler A.H., Waugh D.W., Hurwitz M.M., Polvani L.M.* Why might stratospheric sudden warmings occur with similar frequency in El Niño and La Niña winters? *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. D19106.
<https://doi.org/10.1029/2012JD017777>
20. *Pogoreltsev A.I., Vlasov A.A., Fröhlich K., Jacobi Ch.* Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2007. V. 69. P. 2083–2101.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.05.014>
21. *Погорельцев А.И.* Генерация нормальных атмосферных мод стратосферными васциляциями // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2007. Т. 43. № 4. С. 463–475.
22. *Коваль А.В.* Расчет остаточной меридиональной циркуляции по данным модели средней и верхней атмосферы // *Ученые записки РГГМУ*. 2019а. Т. 55. С. 25–32.
<https://doi.org/10.33933/2074-2762-2019-55-25-32>
23. *Коваль А.В.* Статистически значимые оценки влияния солнечной активности на планетарные волны в средней атмосфере Северного полушария по данным модели МСВА // *Солнечно-земная физика*. 2019б. Т. 5. № 4. С. 64–72.
<https://doi.org/10.12737/szf-54201907>
24. *Ermakova T.S., Aniskina O.G., Statnaya I.A., Motsakov M.A., Pogoreltsev A.I.* Simulation of the ENSO influence on the extra-tropical middle atmosphere // *Earth, Planets and Space*. 2019. V. 71: 8.
<https://doi.org/10.1186/s40623-019-0987-9>
25. *Gavrilov N.M., Koval A.V., Pogoreltsev A.I., Savenkova E.N.* Simulating influences of QBO phases and orographic gravity wave forcing on planetary waves in the middle atmosphere // *Earth Planets and Space*. 2015. V. 67:86.
<https://doi.org/10.1186/s40623-015-0259-2>
26. *Koval A.V., Chen W., Didenko K.A., Ermakova T.S., Gavrilov N.M., Pogoreltsev A.I., Toptunova O.N., Wei K., Yarusova A.N., Zarubin A.S.* Modelling the residual

- mean meridional circulation at different stages of sudden stratospheric warming events // *Ann. Geophys.* 2021. V. 39. P. 357–368.
<https://doi.org/10.5194/angeo-39-357-2021>
27. Гаврилов Н.М., Погорельцев А.И., Якоби К. Численное моделирование влияния широтно-неоднородных гравитационных волн на циркуляцию средней атмосферы // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2005. Т. 41. № 1. С. 14–24.
 28. Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н., Перцев Н.Н. Внезапные стратосферные потепления: роль нормальных атмосферных мод. // *Геоматизм и аэрономия.* 2014. Т. 52. № 2. С. 357–372.
 29. Lindzen R.S. Turbulence and stress owing to gravity wave and tidal breakdown // *J. Geophys. Res.* 1981. V. 86. P. 9707–9714.
 30. Yiğit E., Medvedev A.S. Heating and cooling of the thermosphere by internal gravity waves // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. L14807.
<https://doi.org/10.1029/2009GL038507>
 31. Гаврилов Н.М., Коваль А.В. Параметризация воздействия мезомасштабных стационарных орографических волн для использования в численных моделях динамики атмосферы // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2013. Т. 49. № 3. С. 271–278.
 32. van Niekerk A., Sandu I., Zadra A., Bazile E., Kanehama T., Köhler M., Koo M.-S., Choi H.-J., Kuroki Y., Toy M.D., Vosper S.B., Yudin V. Constraining Orographic Drag Effects (COORDE): A Model Comparison of Resolved and Parametrized Orographic Drag // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems.* 2020. V. 12(11). e2020MS002160.
 33. Swinbank R., O'Neill A. Stratosphere-troposphere assimilation system // *Month. Weather Rev.* 1994. V. 122. P. 686–702.
 34. Scaife A.A., Austin J., Butchart N., Pawson S., Keil M., Nash J., James I. N. Seasonal and interannual variability of the stratosphere diagnosed from UKMO TOVS analysis // *Q. J. R. Met. Soc.* 2000. V. 126. P. 2585–2604.
 35. Yoden S. An illustrative model of seasonal and interannual variations of the stratospheric circulation // *J. Atmos. Sci.* 1990. V. 47. P. 1845–1853.
 36. Holton J.R., Mass C. Stratospheric vacillation cycles // *J. Atmos. Sci.* 1976. V. 33. P. 2218 – 2215.
 37. Birner T., Bönisch H. Residual circulation trajectories and transit times into the extratropical lowermost stratosphere // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 817–827.
<https://doi.org/10.5194/acp-11-817-2011>
 38. Eluszkiewicz J., Crisp D., Zurek R., Elson L., Fishbein E., Froidevaux L., Waters J., Grainger R.G., Lambert A., Harwood R., Peckham G. Residual circulation in the Stratosphere and lower Mesosphere as diagnosed from Microwave Limb Sounder Data // *J. Atmos. Sci.* 1996. V. 53. I. 2. P. 217–240.
 39. Gille J.C., Lyjak L.V., Smith A. The Global Residual Mean Circulation in the Middle Atmosphere for the Northern Winter Period // *J. Atmos. Sci.* 1987. V. 44. I. 10. P. 1437–1452.
 40. Гаврилов Н.М., Коваль А.В., Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н. Численное моделирование волновых взаимодействий во время внезапного стратосферного потепления // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* 2017. Т. 53. № 6. С. 674–685.
<https://doi.org/10.7868/S0003351517060022>
 41. Gray L.J. A model study of the influence of the quasi-biennial oscillation on trace gas distributions in the middle and upper stratosphere // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2000. 105. 4539–4551.
<https://doi.org/10.1029/1999JD900320>
 42. Tung K.K., Yang H. Global QBO in circulation and ozone, II, A simple mechanistic model // *J. Atmos. Sci.* 1994. V. 51. P. 2708–2721.
 43. Hansen F., Matthes K., Gray L.J. Sensitivity of stratospheric dynamics and chemistry to QBO nudging width in the chemistry-climate model WACCM // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2013. V. 118(18). P. 10464–10474.
 44. Dickinson R.E. Planetary Rossby waves propagating vertically through weak westerly wave guides // *J. Atmos. Sci.* 1968. V. 25. P. 984–1002.
 45. Коваль А.В., Гаврилов Н.М., Погорельцев А.И. Чувствительность средней меридиональной циркуляции к воздействию орографических волн при различных фазах квазидвухлетних колебаний в численной модели средней атмосферы // *Хим. Физ.* 2019. Т. 38. № 7. С. 37–43.
<https://doi.org/10.1134/S0207401X19070094>

Modeling of Residual Meridional Circulation at Different Phases of a Quasi-Biennial Oscillation

A. V. Koval^{1, 2, *}, N. M. Gavrilov^{1, **}, A. I. Pogoreltsev^{1, 2, ***}, and M. M. Efimov¹

¹ Saint Petersburg State University, Universitetskaya nab., 7–9, St. Petersburg, 190034 Russia

² Russian State Hydrometeorological University, Voronezhskaya st., 79, St. Petersburg, 192007 Russia

*e-mail: a.v.koval@spbu.ru

**e-mail: n.gavrilov@spbu.ru

***e-mail: apogor@rshu.ru

Sensitivity of the residual meridional circulation (RMC) in the middle and upper atmosphere to the phase change of the quasi-biennial oscillation (QBO) of the low-latitude zonal wind in the stratosphere has been

studied. Wind and temperature fields obtained using a nonlinear numerical model of general circulation of the middle and upper atmosphere “MUAM” have been used to calculate the RMC. Statistically significant results are shown for the first time, illustrating the change in wave-induced eddy flows in the extratropical strato-mesosphere under different QBO phases. In particular, a general weakening of the eddy circulation in the Northern Hemisphere during the westerly QBO phase is demonstrated, with the exception of the region located in the middle latitudes, in the altitude interval of 50–60 km. Investigation of the sensitivity of RMC to changes in QBO phases helps to better understand the features of the dynamic interaction between tropical and extratropical latitudes, as well as different layers of the atmosphere that affect the circulation transport and mixing of long-lived atmospheric components.

Keywords: numerical modeling, residual meridional circulation, quasi-biennial oscillation