УДК551.513:[551.510.533+551.510.536]:001.891.57 doi:10.33933/2074-2762-2019-55-25-32

РАСЧЕТ ОСТАТОЧНОЙ МЕРИДИОНАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ПО ДАННЫМ МОДЕЛИ СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ

А.В. Коваль

Санкт-Петербургский государственный университет, a.v.koval@spbu.ru

Проведено численное моделирование общей циркуляции атмосферы с использованием модели средней и верхней атмосферы (MCBA) для января. Рассмотрены формулы для расчета остаточной меридиональной циркуляции на основе полей ветра и температуры воздуха, полученных из MCBA. Полученные распределения эйлеровой средней и остаточной меридиональной циркуляции согласуются с результатами расчетов, проводившихся ранее как на базе наблюдений, так и в результате модельных экспериментов. Волновой вклад в меридиональную циркуляцию в средней атмосфере может превышать 100 % от соответствующих компонент средней меридиональной скорости и оказывать влияние на меридиональный перенос газовых составляющих атмосферы.

Ключевые слова: атмосферная циркуляция, численное моделирование, остаточная циркуляция.

CALCULATION OF THE RESIDUAL MEAN MERIDIONAL CIRCULATION ACCORDING TO THE MIDDLE AND UPPER ATMOSPHERE MODEL

A.V. Koval

St. Petersburg State University

The general circulation of the middle and upper atmosphere is simulated using the middle and upper atmosphere model (MUAM) for January. Formulas for calculating the residual mean meridional circulation on the basis of wind and temperature fields obtained from MUAM are observed. The obtained distributions of the eulerian meridional mean and residual circulation are consistent with the calculations carried out earlier both on the basis of observations and model experiments. The wave contribution to the meridional circulation in the middle atmosphere can exceed 100% of the corresponding components of the mean meridional velocity, which can have a significant impact on the meridional transport of the gas components of the atmosphere.

Keywords: atmospheric circulation, numerical simulation, residual circulation.

Введение

Циркуляционный перенос газовых примесей между средней атмосферой и тропосферой оказывает влияние на общее распределение озона и других атмосферных газовых составляющих. Предполагается, что общая циркуляция атмосферы является основным механизмом глобального переноса газовых примесей (см., например, [11]). К настоящему времени хорошо известно, что при использовании подхода в рамках обычной эйлеровой средней меридиональной циркуляции, т. е. при зональном осреднении меридионального и вертикального циркуляционных потоков, при условии стационарности и горизонтальной однородности рассматриваемых полей, в уравнениях динамики происходит компенсация волновых источников импульса и тепла адвективными потоками импульса и тепла. Это свойство, известное как теорема Чарни — Дразина о невзаимодействии возмущений со средним потоком [9], не позволяет выделить и диагностировать 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 [8].

С целью преодоления указанного недостатка используется альтернативный подход к анализу зонально осредненной циркуляции, который обеспечивает более эффективную диагностику волнового воздействия на средний поток, а также возможность расчета процессов переноса газовых примесей в меридиональной плоскости. Этот подход представляет собой формулировку преобразованной эйлеровой средней циркуляции (Transformed Eulerian Mean, TEM), впервые введенную в исследовании [6]. Он основан на том, что поскольку некоторый рассматриваемый объем воздуха поднимется до большей высоты равновесного состояния только в том случае, если его потенциальная температура возрастает при неадиабатическом нагреве, то остаточная меридиональная циркуляция, связанная с неадиабатическими процессами, напрямую связана со средним потоком меридиональной массы. 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 [20].

В данном исследовании при помощи модели циркуляции средней и верхней атмосферы (MCBA) производится моделирование атмосферных параметров для января. На основе полученных полей ветра и температуры воздуха рассчитываются вертикальная и меридиональная компоненты средней остаточной меридиональной циркуляции. Исследование 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.

Методы и подходы

Модель общей циркуляции МСВА. Для моделирования общей циркуляции атмосферы в данном исследовании используется нелинейная механистическая численная модель атмосферы MCBA, разрабатываемая в Российском государственном гидрометеорологическом университете [19], которая является модификацией модели COMMA_LIM (Cologne Model of the Middle Atmosphere — Leipzig Institute for Meteorology [12]). В модели решается стандартная система гидродинамических уравнений в сферической системе координат [2]. Горизонтальная сетка имеет 36×64 узла по широте и долготе соответственно. Вертикальная сетка имеет 48 узлов и представляет собой log-изобарическую вертикальную координату в диапазоне высот от 0 до 135 км. Радиационный блок MCBA учитывает суточные и сезонные изменения нагрева атмосферы в ультрафиолетовой и видимой областях спектра (125—700 нм), а также выхолаживание в полосах инфракрасного излучения (8; 9,6; 14 и 15 мкм).

В нижней термосфере учитываются дополнительные динамические источники тепла, обусловленные диссипацией волн, а также ионное торможение, молекулярная и турбулентная вязкость и теплопроводность. В модель включена параметризация тепловых и динамических эффектов неорографических гравитационных волн и горных волн [3]. Стационарные планетарные волны в МСВА генерируются путем задания температуры и геопотенциальной высоты на нижней границе [18]. Модель может также воспроизводить нормальные атмосферные моды с периодом 2—20 суток [4]. Подробную информацию о процессах, учитываемых в МСВА, а также о стадиях инициализации модели, можно найти в [1, 13, 19].

Остаточная меридиональная циркуляция. Остаточная циркуляция в данной работе понимается в контексте преобразованной эйлеровой средней циркуляции [6]. Меридиональную и вертикальную компоненты остаточной средней циркуляции можно получить по формулам [6, 8]

$$\overline{\nu}^* = \overline{\nu} - \rho^{-1} \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \frac{\overline{\nu' \theta'}}{\partial \overline{\theta} / \partial z} \right), \tag{1}$$

$$\overline{w}^* = \overline{w} + \frac{1}{a\cos\varphi} \frac{\partial}{\partial\varphi} \left(\frac{\cos\varphi \overline{v'\theta'}}{\partial\overline{\theta}/\partial z} \right),\tag{2}$$

где черта сверху обозначает зонально осредненные величины, штрихи — отклонения величин от зональноосредненных значений; v и w — меридиональный и вертикальный ветер; ρ — плотность атмосферы; z — вертикальная координата; θ — потенциальная температура; ϕ — широта; a — радиус Земли.

С помощью простых преобразований, учитывая, что потенциальная темпера-

тура описывается формулой $\theta = T \exp\left(\frac{Rz}{C_pH}\right)$, где $R = 287 \text{ м}^2 \cdot \text{c}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ — газовая

постоянная воздуха, H = 7 км — высота однородной атмосферы, C_p — теплоемкость при постоянном давлении, а квадрат частоты Брента — Вяйсяля определя-

ется формулой
$$N^2 = \frac{g}{\overline{T}} \left(\frac{\partial \overline{T}}{\partial z} + \frac{g}{C_p} \right)$$
, можно получить уравнения для $(\overline{v}^*, \overline{w}^*)$

в терминах возмущения обычной температуры [16].

Определим отклонения от средних зональных компонент скорости ветра как $v' = v - \overline{v}$; $w' = w - \overline{w}$ и проведем ряд преобразований для получения используемых нами уравнений для расчета меридиональной и вертикальной компонент остаточной средней циркуляции на основе полей ветра и температуры, моделируемых в MCBA:

$$\overline{\nu}^* = \overline{\nu} - \frac{1}{\partial \overline{\Theta} / \partial z} \left(-\frac{\overline{\nu' \Theta'}}{H} + \frac{\partial \overline{\nu' \Theta'}}{\partial z} - \frac{\overline{\nu' \Theta'}}{\partial \overline{\Theta} / \partial z} \frac{\partial^2 \overline{\Theta}}{\partial z^2} \right), \tag{3}$$

27

$$\overline{w}^* = \overline{w} + \frac{1}{a\cos\varphi} \frac{1}{\partial\overline{\theta}/\partial z} \left(-\sin\varphi \overline{v'\theta'} + \cos\varphi \left(\frac{\partial\overline{v'\theta'}}{\partial\varphi} - \frac{\overline{v'\theta'}}{\partial\overline{\theta}/\partial z} \frac{\partial^2\overline{\theta}}{\partial z\partial\varphi} \right) \right). \tag{4}$$

В отличие от обычной средней эйлеровой циркуляции остаточная вертикальная скорость для осредненных по времени условий пропорциональна скорости неадиабатического нагрева. Она приблизительно представляет собой неадиабатическую циркуляцию в меридиональной плоскости [20], то есть циркуляцию, при которой происходит неадиабатический нагрев поднимающегося объема воздуха и неадиабатическое охлаждение опускающегося и при этом их потенциальная температура приспосабливается 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.

Результаты расчетов

Для расчета остаточной меридиональной циркуляции в данном исследовании использовались поля атмосферных параметров, полученные в результате численного моделирования атмосферной циркуляции с помощью модели MCBA для января.

На рис. 1 представлены схематические линии тока в меридиональной плоскости (слева) и векторы, отражающие среднюю остаточную меридиональную циркуляцию на высоте 0—60 км, рассчитанную по формулам (3) и (4) (справа). На рис. 1 а представлены распределения, рассчитанные по модели МСВА, а на рис. 1 б — по данным ретроспективного анализа метеорологической информации MERRA-2 [14] за 2010 г. Данные осреднены по долготе и за январь. На рисунках слева хорошо различимы две основные ячейки остаточной циркуляции с восходящим потоком в низких и средних широтах Южного полушария и нисходящими потоками в высоких широтах обоих полушарий. В отличие от средней «эйлеровой» меридиональной циркуляции, которая состоит из трех пар ячеек (тропические ячейки Хэдли, управляемые неадиабатическим нагревом, вихревые среднеширотные ячейки Феррела и генерируемые температурными градиентами полярные ячейки), остаточная циркуляция состоит из двух ячеек Хэдли, рапространяющихся от экваториальных широт к полярным [8]. При этом в зимний период, в нашем случае в Северном полушарии, ячейка циркуляции значительно крупнее, чем в Южном полушарии, а скорость остаточного меридионального и вертикального ветра выше, что показано на рис. 1 справа.

Сравнение рис. 1 a и b показывает, что наблюдается соответствие структуры и величины меридиональной циркуляции по модельным данным и наблюдаемым ассимилированным данным. Распределения линий тока для января, аналогичные приведенным на рис. 1 слева, были получены в работе [7], в которой остаточная средняя меридиональная циркуляция рассчитывалась на основе данных модели общей циркуляции СМАМ (Canadian Middle Atmosphere Model). Помимо



Рис. 1. Широтно-высотные распределения остаточной меридиональной циркуляции на базе расчетов MCBA (*a*) и по данным реанализа MERRA-2 (б) для января: среднезональные схематические линии тока (слева) и векторы (справа, горизонтальная компонента ветра в м/с, вертикальная в см/с).

Серо-голубым тоном обозначен отрицательный (направленный на юг) остаточный меридиональный ветер.

модельных данных, для анализа остаточной меридиональной циркуляции использовались данные наблюдений с помощью микроволнового контура (MLS) на борту спутника исследования верхней атмосферы (UARS). В работе [10] представлены распределения вертикальной и меридиональной компонент остаточной циркуляции, которые согласуются с рассчитанными автором данными. Хорошее соответствие с данными, представленными на рис. 1, также было получено в исследовании Gille с соавторами [15], где представлены поля остаточной меридиональной циркуляции для зимних месяцев в Северном полушарии, рассчитанные на базе спутниковых данных LIMS (Limb Infrared Monitor of the Stratosphere на спутнике Nimbus-7).

На рис. 2 представлены меридиональная (см. рис. 2 *a*) и вертикальная (см. рис. 2 *б*) компоненты среднезональной эйлеровой циркуляции (слева), остаточной средней циркуляции (в центре), рассчитанные по формулам (3) и (4), и волновой



Рис. 2. Меридиональная, м/с (*a*) и вертикальная, см/с (б) компоненты среднезональной эйлеровой циркуляции (слева), остаточной циркуляции (в центре) и волновой составляющей меридиональной циркуляции (справа) для января.

Черные контуры соответствуют нулевым значениям.

составляющей меридиональной циркуляции (справа), полученные на основе данных МСВА для января. На рисунках слева можно увидеть, что на высоте менее 60 км меридиональная и вертикальная компоненты среднего ветра образуют три пары ячеек циркуляции в низких, средних и высоких широтах обоих полушарий (см выше). На рисунках в центре видны только две ячейки остаточной меридиональной циркуляции: меньшая в Южном полушарии и большая в экваториальных широтах и в Северном полушарии. Такая структура характерна для января (см., например, [8]). Максимальная скорость меридиональной циркуляции наблюдаются на высоте 70—90 км.

Рассчитанные в МСВА компоненты средней меридиональной циркуляции, представленные на рис. 2 слева, сравнивались с распределениями меридионального и вертикального ветра, полученными по базам данных реанализа метеорологической информации JRA-55 (Japanese 55-year Reanalysis, [17]), и MERRA-2 [14]. Было обнаружено сходство модельных и наблюдаемых данных.

На рис. 2 справа видно, что волновая составляющая меридиональной циркуляции является максимальной в Северном, «зимнем» полушарии, и это согласуется с существующей теорией [6, 8]. На высотах средней атмосферы она может превышать 100 % соответствующих компонент средней меридиональной циркуляции, внося существенный вклад в меридиональный перенос газовых примесей.

Заключение

В настоящем исследовании проведено численное моделирование общей циркуляции средней атмосферы с использованием модели МСВА для января. Получены данные о средней меридиональной циркуляции в слое от поверхности до высоты 100 км. Представлены формулы для расчета средней остаточной меридиональной циркуляции по данным МСВА, рассчитаны остаточная циркуляция и волновые компоненты меридиональной циркуляции.

Показано, что полученные распределения средней и остаточной меридиональной циркуляции согласуются с данными наблюдений и с результатами предыдущих расчетов, проводившихся как на основе обработки данных наблюдений, так и в результате проведения модельных экспериментов.

Волновой вклад в меридиональную циркуляцию является максимальным в Северном полушарии. При этом в средней атмосфере этот вклад может превышать 100 % соответствующих компонент средней меридиональной скорости и оказывать существенное влияние на меридиональный перенос газовых примесей в атмосфере.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 18-77-00022).

Список литературы

- 1. Гаврилов Н.М., Коваль А.В., Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н. Численное моделирование реакции общей циркуляции средней атмосферы на пространственные неоднородности орографических волн // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 4. С. 401—408.
- 2. Гаврилов Н.М., Погорельцев А.И., Якоби К. Численное моделирование влияния широтно-неоднородных гравитационных волн на циркуляцию средней атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41, № 1. С. 9—18.
- Коваль А. В., Гаврилов Н. М. Параметризация воздействия орографических волн на общую циркуляцию средней и верхней атмосферы // Ученые записки РГГМУ. 2011. Вып. 20. С. 85—89.
- 4. Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н., Перцев Н.Н. Внезапные стратосферные потепления: роль нормальных атмосферных мод // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т. 52. Вып. 2. С. 357—372.
- Andrews D. G., and 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.
- Andrews D.G., Holton J.R., Leovy C.B. Middle Atmosphere Dynamics // Academic Press, Orlando, FL. 1987. 489 p.
- 7. *Birner T., Bönisch H.* Residual circulation trajectories and transit times into the extratropical lowermost stratosphere // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11. P. 817–827. doi 10.5194/acp-11-817-2011.
- 8. Butchart N. The Brewer-Dobson circulation // Rev. Geophys. V. 52. P. 157-184. doi:10.1002/2013RG000448.
- Eliassen A., Palm E. On the transfer of energy in stationary mountain waves // Geophys. Norv. 1961. V. 22. P. 1–23.
- Eluszkevicz J., Crisp D., Zurek R., Elison L. et al. Residual circulation in the Stratosphere and lower Mesosphere as diagnosed from Microwave Limb Sounder Data // J. Atm. Sci. 1996. V. 53. I. 2. P. 217—240.
- 11. Fishman J., Crutzen P. J. The origin of ozone in the troposphere // Nature. 1978. V. 274. P. 855-857.
- Fröhlich K., Pogoreltsev A., Jacobi Ch. Numerical simulation of tides, Rossby and Kelvin waves with the COMMA-LIM model // Advances in Space Research. 2003. V. 32. P. 863—868.

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ РГГМУ № 55

- Gavrilov N.M., Koval A.V., Pogoreltsev A.I., Savenkova E.N. Simulating planetary wave propagation to the upper atmosphere during stratospheric warming events at different mountain wave scenarios // Advances in Space Research. 2018. V. 61, I. 7. P. 1819—1836. doi 10.1016/j.asr.2017.08.022
- Gelaro R., McCarty W., Suárez M. J., Todling R. et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2) // J. Climate. 2017. V. 30 (14). P. 5419—5454. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1
- Gille J. C., Lyjak L. V., Smith A. The Global Residual Mean Circulation in the Middle Atmosphere for the Northern Winter Period // J. Atm. Sci. 1987. V. 44, I. 10. P. 1437—1452.
- Holton J. R. An Introduction to Dynamic Meteorology. Fourth edition. Elsevier Academic Press. 2004. 535 p.
- Kobayashi S., Ota Y., Harada H. The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics // J. Meteorol. Soc. Jpn. 2015. V. 93. P. 5–48. doi:10.2151/jmsj.2015-00
- Koval A.V., Gavrilov N.M., Pogoreltsev A.I., Savenkova E.N. Comparisons of planetary wave propagation to the upper atmosphere during stratospheric warming events at different QBO phases // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2018. V. 171. P. 201—209. doi: 10.1016/j.jastp.2017.04.013
- Pogoreltsev A.I., Vlasov A.A., Froehlich K., Jacobi Ch. Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2007. V. 69. P. 2083—2101. doi: 10.1016/j.jastp.2007.05.014
- 20. Shepherd T. G. Transport in the middle atmosphere // J. Meteor. Soc. Japan. 2007. 85B. P. 165-191.