УДК 551.513, 551.513.11, 551.511.3
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-395
ORCID: 0009-0004-1992-0111

АНАЛИЗ ВКЛАДА АКТИВНОСТИ КВАЗИ-ДЕСЯТИДНЕВНОЙ ВОЛНЫ В ЦИРКУЛЯЦИЮ СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ В ВЕСЕННИЙ ПЕРИОД В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ

А.В. Шнайдер

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия, anscheinend21@yandex.ru

ANALYSIS OF CONTRIBUTION OF QUASI-10-DAY WAVE ACTIVITY TO MIDDLE ATMOSPHERE CIRCULATION IN THE NORTHERN HEMISPHERE DURING SPRING

A.V. Schneider

Saint Petersburg State University, St Petersburg, Russia, anscheinend21@yandex.ru

Аннотация. В настоящей работе выполнен анализ активности квази-десятидневной волны в весенний период в Северном полушарии и ее влияния на изменчивость меридиональной циркуляции. Анализ данных о геопотенциальной высоте реанализа UK Met Office показал существенную межгодовую изменчивость амплитуды волны в весенние месяцы. С помощью модели МСВА (модели средней и верхней атмосферы) выполнялось численное моделирование состояния средней и верхней атмосферы при различном усилении квази-десятидневной волны. Результаты моделирования показывают, что с увеличением амплитуды квази-десятидневной волны в модели отклик в термодинамическом состоянии атмосферы также усиливается, но само усиление растет нелинейно.

Ключевые слова: нормальные атмосферные моды, волны Россби, остаточная меридиональная циркуляция, динамика средней атмосферы

Abstract. In this paper, the activity of the quasi-10-day wave during the spring season in the Northern Hemisphere and its influence on the variability of meridional circulation were analyzed. Examination of geopotential height data from the UK Met Office reanalysis revealed substantial interannual variability in the wave amplitude during the spring months. Numerical simulations of the state of the middle and upper atmosphere were performed using the MUAM (Middle and Upper Atmosphere Model) under varying levels of quasi-10-day wave forcing. The modeling results demonstrate that an increase in the amplitude of the quasi-10-day wave leads to a stronger response in the thermodynamic state of the atmosphere; however, this enhancement grows nonlinearly.

Keywords: normal atmospheric modes, Rossby waves, residual meridional circulation, middle atmosphere dynamics

ВВЕДЕНИЕ

Основной механизм глобального переноса в атмосфере Земли — это меридиональная циркуляция [Dobson, 1956; Dobson et al., 1929; Brewer, 1949]. В нижней и средней атмосфере тропосферный воздух поступает в стратосферу в тропиках, затем перемещается в сторону полюса и опускается в средних и высоких широтах. На больших высотах токи меридиональной циркуляции направлены из летнего полушария в зимнее, обеспечивая, таким образом, обмен массой и количеством движения в глобальном масштабе. С другой стороны, известно, что волны планетарного масштаба могут существенно изменять среднюю эйлерову меридиональную циркуляцию.

Чтобы обеспечить оценку влияния волн на средний поток и рассчитывать меридиональный перенос массы и трассеров в атмосфере, удобно использовать метод, в котором используется преобразованная эйлерова средняя циркуляция (Transformed Eulerian Mean, TEM) [Andrews et al., 1987]. В таком случае рассматривается так называемая остаточная средняя меридиональная циркуляция – суперпозиция индуцированных вихрями и адвективных зонально-средних потоков [Koval et al., 2021]. В данной работе рассматривается оценка вклада доминирующей в весенние месяцы моды атмосферы в вариации атмосферной циркуляции с учетом отклика изменчивости амплитуды в рассчитываемых компонентах остаточной меридиональной циркуляции (ОМЦ).

Чтобы проанализировать межгодовую и внутрисезонную изменчивость амплитуд квази-десятидневной волны (К10ДВ) в весенние месяцы в Северном полушарии, были использованы данные реанализа UK Met Office о геопотенциальной высоте. Ввиду ограниченности данных по времени, использовался период с 2010 по 2021 год.

Для оценки вклада 10-дневных планетарных волн в динамический режим МНТ области использовалась модель МСВА (модель средней и верхней атмосферы). Данная модель имеет 56 вертикальных уровней, что позволяет охватить весь диапазон рассматриваемого домена; горизонтальная сетка имеет разрешение 5ºx5.625º (широта и долгота). В модели предусмотрена возможность возбуждения планетарных волн вблизи поверхности Земли. Для воспроизведения НАМ в МСВА используются дополнительные слагаемые в уравнении теплового баланса, имеющие форму зависящих от времени синусоидальных гармоник с зональными волновыми числами m = 1 и m = 2 и периодами, совпадающими с моделируемыми НАМ. Для задания широтной структуры компонент НАМ параметризация использует соответствующие функции Хафа.

Для анализа эффекта от усиления 10-дневной планетарной волны выполнялись расчеты для условий апреля. В результате расчетов с помощью МСВА были получены метеорологические

характеристики циркуляции атмосферы в зимне-весенний период, на основе которых рассчитывались остаточная меридиональная циркуляция в концепции преобразованного эйлерова среднего. Детальное описание концепции и формулы для расчета компонент остаточной циркуляции представлены в [Koval et al., 2021].

АНАЛИЗ МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА UK MET OFFICE

В качестве исходных данных были использованы данные о геопотенциальной высоте реанализа UK Met Office. Рассматривалась волновая активность в марте – апреле за период с 2011 по 2022 год. Чтобы выделить амплитуды зональных гармоник, поля геопотенциальной высоты раскладывались в ряд Фурье по долготе. Далее выполнялся анализ только первой гармоники (СПВ1), так как она имеет наибольшие значения амплитуд, и её влияние на общую циркуляцию и меридиональный перенос наиболее значимо. Для выделения временных периодик, которые имеют максимальные амплитуды, было выполнено вейвлет-разложение Морле [Daubechies, 1990]. Таким образом, для каждого года было получено распределение амплитуд с периодами от 2 до 40 дней. При выполнении вейвлет-преобразования, волны разделяются на бегущие на запад, восток и стоячие. Так как максимальные значения амплитуд соответствуют бегущим на запад гармоникам, далее рассматривались только эти компоненты. Для построения вейвлет-разложений был выбран высотный уровень 50 км и широта 62 ° с.ш.

Анализ вейвлет-спектров показал, что среднее межгодовое значение амплитуды квази-десятидневной волны составляло 43.5 гп.м., при этом наиболее высокая средняя амплитуда наблюдалась в 2016 году и составила 153,8 гп.м, при этом максимальные значения достигали 353,7 гп.м. Минимальная активность отмечена в 2012 году — средняя амплитуда 12,2 гп.м, максимальная — 48,9 гп.м. Таким образом, межгодовая изменчивость амплитуды квази-десятидневной планетарной волны превышает порядок величины.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КВАЗИ-ДЕСЯТИДНЕВНОЙ ВОЛНЫ НА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АТМОСФЕРЫ

Было выполнено три прогона модели с одинаковыми начальными условиями — контрольный (без усиления волн), и два с разным усилением квази-десятидневной волны: в два и четыре раза.

В контрольном эксперименте, который проводился в стандартных условиях, средняя амплитуда квази-десятидневной волны в апреле оказалась примерно в 2 раза выше средней межгодовой амплитуды по данным реанализа UKMO — примерно 80 гп. м. В экспериментах с усилением К10ДВ в 2 и 4 раза значение амплитуды волны линейно росло, и достигло соответственно 160 и 320 гп. м; значение амплитуды в варианте модели с усилением волны в 4 раза примерно соответствует экстремальному значению, отмеченному в 2016 году.

Для анализа влияния усиления волны на термодинамический режим атмосферы на основании полученных полей ветра и температуры были составлены широтно-высотные разрезы по данным, усреднённым за апрель. Соответствующие графики приведены на рисунках 1–3; на них представлено поле контрольного прогона модели, и два поля разности между усиленным и контрольным вариантом модели.

Усиление К10ДВ приводит к заметным изменениям в полях термодинамических характеристик атмосферы. В поле зонального ветра (Рис. 1) наблюдается усиление восточных ветров над полярным вихрем в Южном полушарии и над экватором, ослабление разрушающегося полярного вихря в Северном полушарии (ускоряется весенняя перестройка атмосферы), усиливаются западные ветра в нижней термосфере. Качественная структура аномалий сохраняется при переходе от эксперимента х2 к х4, однако величина изменений заметно увеличивается. При двукратном усилении волнового форсинга аномалии находятся в интервале [–0,7; 0,7] м/с, в то время как при четырёхкратном усилении в интервале [–3,0; 2,4] м/с.

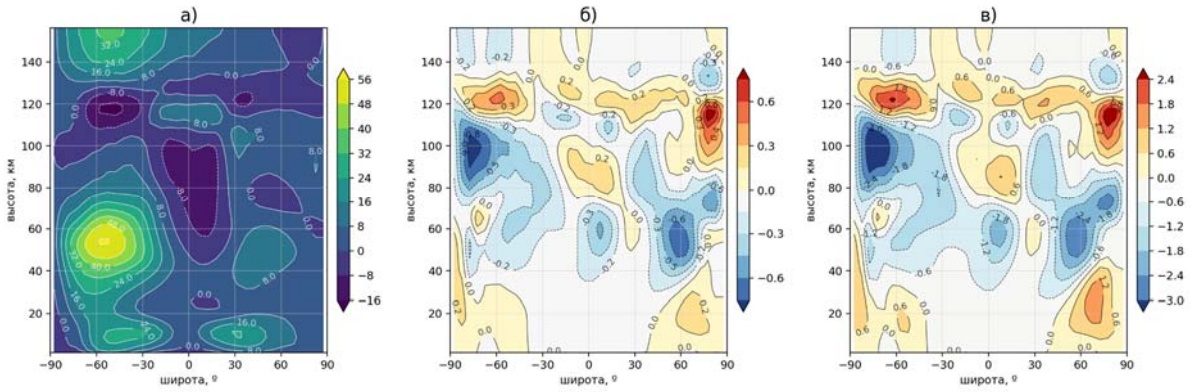

Рисунок 1. Широтно-высотный разрез поля среднего зонального ветра за апрель. *а* — контрольный вариант, *б* и *в* — разница между усиленным в 2 и 4 раза и контрольным вариантом, соответственно.

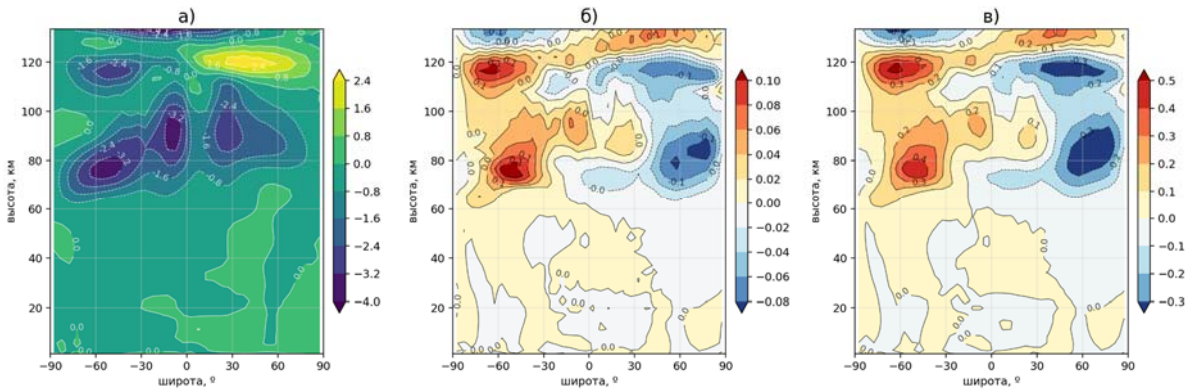

Рисунок 2. Широтно-высотный разрез поля среднего меридионального ветра за апрель. *а* — контрольный вариант, *б* и *в* — разница между усиленным в 2 и 4 раза и контрольным вариантом, соответственно.

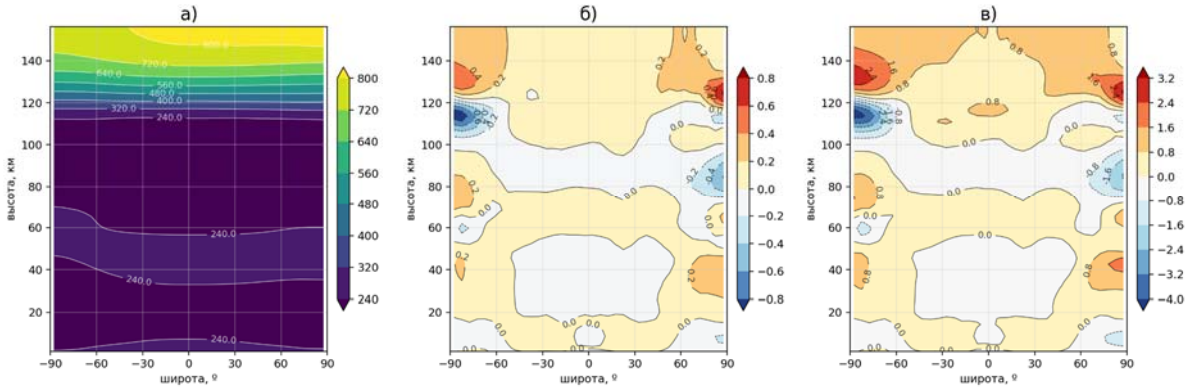

Рисунок 3. Широтно-высотный разрез поля средней температуры за апрель. *а* — контрольный вариант, *б* и *в* — разница между усиленным в 2 и 4 раза и контрольным вариантом, соответственно.

В поле меридионального ветра (Рис. 2) значительные изменения наблюдаются только в слоях выше стратосферы — меняется происходящая в мезосфере зимне-летняя циркуляция, направленная из летнего в зимнее полушарие. В обоих полушариях аномалии, вызванные усилением К10ДВ, направлены к экватору, то есть в Северном полушарии данная циркуляция усиливается, а в Южном ослабевает. Кроме того, ослабевает дипольная циркуляция на высоте примерно 120км. Значения изменений, вызванных усилением К10ДВ, в варианте с усилением волны в 2 раза находятся в диапазоне [–0,08; 0,10] м/с, в варианте с четырёхкратным усилением — [–0,3; 0,5] м/с.

В поле температуры (Рис. 3) отклик носит иной характер, нежели в полях ветра: в высоких широтах преобладает общее потепление, а в низких и средних широтах наблюдается чередование знака аномалии: потепление в тропосфере, охлаждение в стратосфере, потепление в мезосфере, охлаждение в зоне мезопаузы и нижней термосферы, потепление в термосфере.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КВАЗИ-ДЕСЯТИДНЕВНОЙ ВОЛНЫ НА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ

Помимо термодинамических полей, в настоящей работе особое внимание уделено отклику остаточной меридиональной циркуляции (ОМЦ) в трансформированном эйлеровом среднем (Transformed Eulerian Mean, TEM) представлении. ОМЦ позволяет выявить механизм воздействия планетарных волн на среднюю атмосферу. Согласно теории взаимодействия волн со средним потоком, планетарные волны генерируют остаточную циркуляцию посредством диссипации и нелинейных взаимодействий, которая, в свою очередь, определяет крупномасштабный перенос тепла, импульса и атмосферных составляющих.

В отличие от среднего меридионального ветра v, который включает как среднюю циркуляцию, так и прямые проявления волновых возмущений, остаточное меридиональное v* в TEM-представлении отражает эффективную циркуляцию, индуцированную планетарными волнами. На рисунке 4 представлены широтно-высотные разрезы вклада К10ДВ в ОМЦ. Структура вклада остаётся устойчивой при усилении волны, но при этом сильно изменяются её значения — в контрольном варианте значения вклада находятся в интервале [–0,03; 0,02] м/с, при двукратном усилении — [–0,12; 0,08] м/с, при четырёхкратном — [–0,48; 0,32] м/с. Таким образом, при усилении волны её вклад в циркуляцию изменяется нелинейно. При четырёхкратном усилении волны (аналогичном максимальному наблюдаемому в реальной атмосфере) её вклад в меридиональную циркуляцию сопоставим по порядку с общим значением по динамическому режиму.

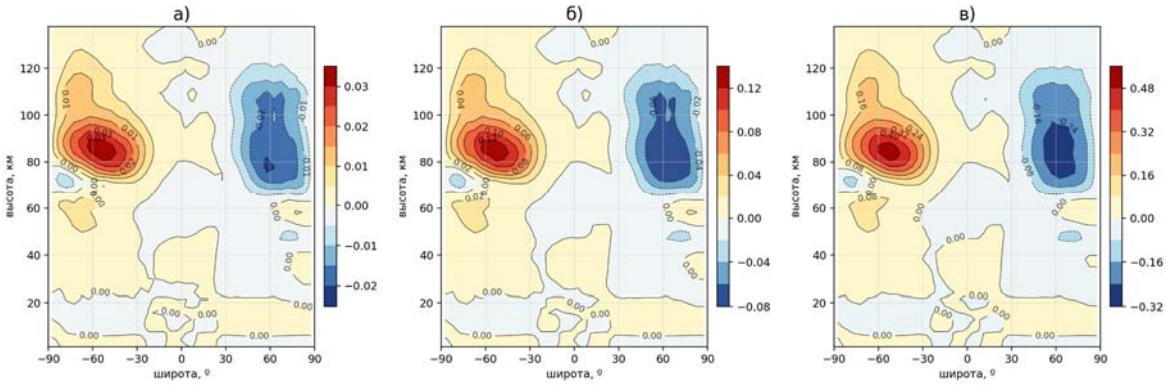

Рисунок 4. Широтно-высотный разрез поля среднего за апрель вклада К10ДВ в меридиональную составляющую ОМЦ. *а* — контрольный вариант, *б* и *в* — варианты с усилением К10ДВ в 2 и 4 раза соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ показал, что межгодовая изменчивость амплитуды К10ДВ в средней атмосфере крайне высока. Численные эксперименты с усилением волнового форсинга продемонстрировали, что увеличение амплитуды К10ДВ приводит к значительному изменению ветрового режима и термической структуры средней атмосферы. В частности, наблюдается заметное изменение приполярных вихрей, зимне-летней мезосферной циркуляции, и области солнечных приливов.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ (грант № 25-47-00122).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Andrews, D. G., Holton, J. R., and Leovy, C. B. Middle Atmosphere Dynamics, Academic Press, Orlando, Florida, USA, 1987.

Brewer, A. W. Evidence for a world circulation provided by measurements of helium and water vapour distribution in the stratosphere // Q. J. Roy. Meteor. Soc., 75, 351–363, 1949.

Daubechies, I. The wavelet transform, time–frequency localization and signal analysis // IEEE Transactions on Information Theory 5, 961–1005, 1990.

Dobson, G. M. B., Harrison, D. N., and Lawrence, J. Measurements of the amount of ozone in the Earth's atmosphere and its relation to other geophysical conditions // P. Roy. Soc. A-Math. Phy., 122, 456–486, 1929.

Dobson, G. M. B. Origin and distribution of polyatomic molecules in the atmosphere // P. Roy. Soc. A-Math. Phy., 236, 187–193, 1956.

Koval A.V., Wen Chen, K Didenko, T Ermakova, N. Gavrilov, A. Pogoreltsev, O. Toptunova, Ke Wei, A. Yarusova, A. Zarubin. Modelling the residual mean meridional circulation at different stages of sudden stratospheric warming events // Ann. Geophys., 39, 357–368, 2021.