

УДК [551.513+551.574.1]:001.891.573(213.5)

К.К. Кандиева, О.Г. Анискина, А.И. Погорельцев

МОДЕЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК ГЕНЕРАЦИИ ОСЦИЛЛЯЦИИ МАДДЕНА–ДЖУЛИАНА

Российский государственный гидрометеорологический университет,
kanykeikandieva@gmail.com

K.K. Kandieva, O.G. Aniskina, A.I. Pogoreltsev

MODEL SOURCE OF MADDEN–JULIAN OSCILLATION FORCING

В статье рассмотрена пространственно-временная изменчивость нагрева атмосферы за счет выделения скрытого тепла конденсации в тропической области с использованием данных реанализа. Предложена модельная аппроксимация источника нагрева, приводящего к генерации осцилляции Маддена–Джулиана. Выполнен сравнительный анализ модельных результатов с данными наблюдения. Полученная модель осцилляции Маддена–Джулиана будет использована для моделирования ее влияния на динамические процессы в высоких широтах.

Ключевые слова: осцилляция Маддена–Джулиана, скрытое тепло конденсации, модельный источник нагрева атмосферы.

Spatial and temporal variability of atmospheric heating due to latent heat release in the tropical region has been considered on the basis of data reanalysis. Model approximation of the heating source that leads to the Madden-Julian oscillation forcing is suggested. The comparison of model results with the observations has been performed. The obtained model of Madden — Julian oscillation will be used to assess its impact on dynamical processes of polar region.

Keywords: Madden–Julian oscillation, latent heat, source of heat.

Введение

Процесс формирования погодных условий Северного полушария в значительной мере зависит от генерации и распространения низкочастотных атмосферных возмущений [1]. Одним из примеров низкочастотного возмущения является осцилляция Маддена–Джулиана (ОМД). ОМД — доминирующее крупномасштабное колебание в тропической области, которое определяет внутрисезонную изменчивость атмосферных процессов. На начальной стадии ОМД зарождается облачность над Индийским океаном, которая затем перемещается вдоль экватора в восточном направлении, а достигнув центральной части Тихого океана, рассеивается. Путь движения облачности от Индийского океана до Тихого океана разделяют на 8 фаз. Фазу осцилляции (положение облачности) и амплитуду (мощность облачности) определяют с помощью индекса ОМД (ИОМД), который был предложен в работе [11, 15].

Согласно ИОМД, схема эволюции осцилляции Маддена–Джулиана во время зимних месяцев выглядит следующим образом:

А) Во время 1-й фазы наблюдаются две ячейки облачности над Африкой или западной частью Индийского океана и над центральной частью Тихого океана;

первая ячейка — это зарождающаяся облачность нового цикла ОМД, вторая ячейка — рассеивающаяся облачность предыдущего цикла.

Б) Во время 2 и 3 фаз происходит дальнейшее развитие и усиление мощности ячейки облачности, которая движется над Индийским океаном.

В) Зона конвективной облачности достигает максимума в развитии во время 4-й, 5-й фаз и находится в долготном поясе, соответствующим Австралии.

Г) Интенсивность роста конвективной облачности уменьшается во время 6, 7 и 8-й фаз, в то время как она находится над западной частью Тихого и движется к центральной части Тихого океана.

Период ОМД меняется в интервале от 30 до 60 суток. Скорость движения облачности приблизительно 5 м/с [8,13]. ОМД является существенным источником нагрева атмосферы в тропической области, т. к. в процессе развития облачности выделяется скрытое тепло конденсации. Связанный с ОМД неадиабатический нагрев регулирует циркуляцию атмосферы не только тропических, но и высоких широт. В качестве теоретического определения в моделях общей циркуляции атмосферы (ОЦА) модель ОМД можно представить в виде источника нагрева атмосферы в тропической области. В работе [4] модель ОМД представлена в виде волнового возмущения с зональным волновым числом 2, области аномалий нагрева движутся вдоль экватора с периодом 48 дней.

Целью данного исследования является построение модели источника нагрева, возникающего в процессе ОМД, и ее верификация по данным наблюдений. Модель источника нагрева в дальнейшем будет использована в модели ОЦА для изучения влияния ОМД на активность планетарных волн. Исследование взаимодействия между ОМД и волновыми процессами является актуальной задачей, т. к. изменение активности планетарных волн влияет на динамические процессы во внетропической стратосфере (формирование и разрушение стратосферного полярного вихря), а также на содержание озона в зимней стратосфере [3].

Вычисление нагрева

Для построения модели источника ОМД на основе данных нагрева атмосферы произведен анализ пространственной изменчивости полей нагрева в зоне действия ОМД. Исследовались данные о конвективных осадках реанализа MERRA [9] за период с 1990 по 2014 г. с дискретностью 3 часа [14]. Оценки скрытого тепла конденсации в облаках вертикального развития были рассчитаны по количеству конвективных осадков с помощью полуэмпирического выражения, предложенного в работе [7]:

$$J(Z, \varphi) = J_z(Z) J_\varphi(\varphi),$$

где $J_\varphi(\varphi)$ — распределение интенсивности осадков по широте; $J_z(Z)$ — функция распределения скрытого тепла по вертикали в зависимости от интенсивности осадков у поверхности Земли:

$$J_z(Z) = A \left\{ \exp \left[- \left(\frac{Z - 6,5}{5,39} \right)^2 \right] - 0,23 \exp \left(\frac{Z}{1,31} \right) \right\},$$

где A — константа, равная 5,34 мВт/кг, которая соответствует осадкам интенсивностью 1 мм/сут.

ОМД имеет большую протяженность вдоль экваториального пояса: продвигаясь от западной части Индийского океана, временами она достигает Атлантического океана. Анализ структуры профилей нагрева за счет конденсации (рис. 1) показывает, что нагрев атмосферы происходит на всех долготах с максимумом в интервале 120° – 150° в. д. (рис. 1, а). По широтам область нагрева за счет конденсации ограничена 20° ю. ш. и 20° с. ш. (рис. 1, б).

Вертикальный профиль нагрева атмосферы зависит от вклада различных форм облачности во время ОМД. В скоплениях облачности, связанной с ОМД, наблюдаются как облака вертикального развития, так и облака среднего яруса. В работе [5] проведен анализ характеристик скрытого тепла в зависимости от формы наблюдаемой облачности. Во время всего цикла осцилляции амплитуда нагрева атмосферы зависит от стадии развития ОМД, но высоты максимального нагрева остаются неизменными — 3 и 6 км. Нагрев атмосферы на высоте 3 км связан с кучевыми облаками, нагрев на 6 км происходит из-за развитой мезомасштабной конвективной ячейки, с прилегающей облачностью среднего яруса.

На рис. 2 представлен вертикальный профиль среднего нагрева атмосферы за счет скрытого тепла конденсации, рассчитанный за период 1990–2014 гг. на широте экватора. Максимум нагрева находится на высоте 7 км, амплитуда нагрева равна 1,6 К/сут. Разница между высотой максимума нагрева в работе [5] и высотой, полученной в данной работе, возникла из-за вычисления значений скрытого тепла до высоты тропической тропопаузы с вертикальным разрешением модели общей циркуляции атмосферы МСВА, которая будет использоваться в дальнейших исследованиях.

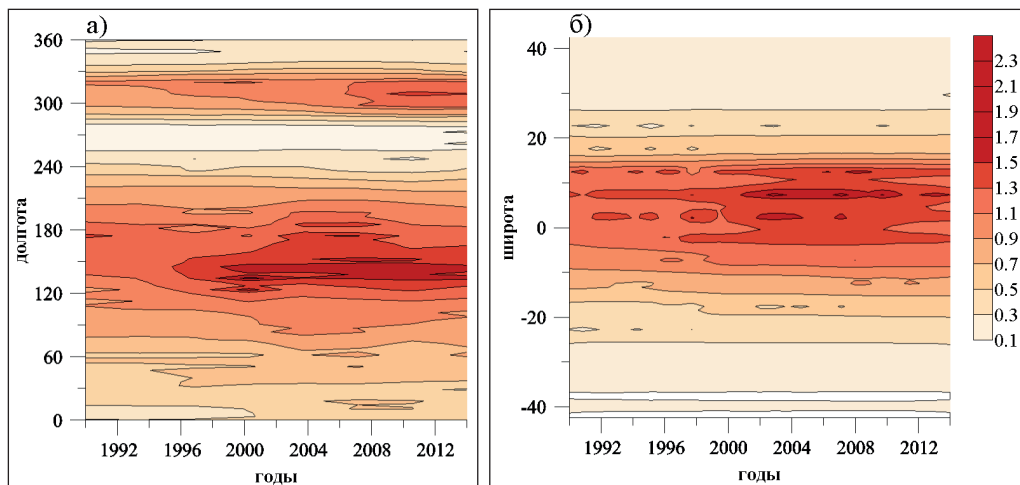


Рис. 1. Распределение среднего за холодную часть года (ноябрь — апрель) скрытого тепла конденсации (К/сут.) на высоте 7 км: а — разрез долгота — время, область усреднения 30° ю. ш. — 30° с. ш.; б — разрез широта — время

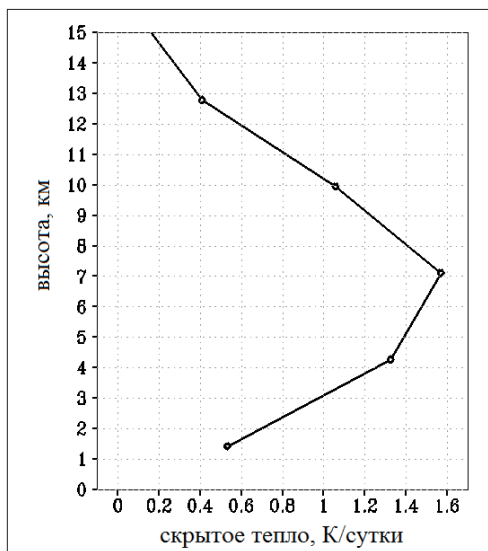


Рис. 2. Вертикальный профиль среднего нагрева атмосферы за счет скрытого тепла конденсации (К/сут.) в холодную половину года (ноябрь — апрель)

Построение модельного источника

Построение модели источника скрытого тепла конденсации ОМД основано на фундаментальных свойствах ОМД — фазовой скорости, периоде колебания, восточном направлении распространения и полученных профилях нагрева атмосферы. Исходя из этого, ОМД можно представить в виде источника тепла, перемещающегося на восток с фазовой скоростью порядка 5 м/с. Области нагрева должны иметь эллиптическую форму, вытянутую вдоль широтного круга в полосе от 15° ю. ш. до 15° с. ш. Максимальное значение скрытого тепла конденсации приходится на 120° в. д., т. к. на этой долготе наблюдается максимум амплитуды колебания конвективной облачности, связанной с ОМД. В вертикальном профиле максимум приходится на высоту 7 км, амплитуда нагрева равна 1,5 К/сут. (наблюдаемая амплитуда нагрева для ОМД [12]).

В соответствии с вышесказанным выражение, аппроксимирующее бегущий источник тепла, имеет вид:

$$Q(x, y, z, t) = A \left[1 + \cos(m\lambda - \omega t) \right] \exp \left[- \left(\frac{x - x_0}{x_0} \right)^2 - \left(\frac{y}{y_0} \right)^2 - \left(\frac{z - z_0}{z_0} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где $Q(x, y, z, t)$ — нагрев атмосферы, который зависит от долготы, широты, высоты и времени; A — амплитуда нагрева 1,5 К/сут.; m — зональное волновое число; λ — долгота; $\omega = 2\pi/T$ — угловая скорость вращения Земли; $x_0 = 120^\circ$ в. д., долгота, на которую приходится максимальный нагрев, $y_0 = 15^\circ$, $z_0 = 7$ км, высота максимального значения.

Период ОМД меняется от 30 до 60 суток, конвективная зона, связанная с ОМД, медленно движется в восточном направлении со скоростью приблизительно 5 м/с. При задании периода и фазовой скорости можно рассмотреть два варианта источника нагрева атмосферы (или два вида возмущения). Фазовой скорости, равной 5 м/с и периоду колебания $T = 30$ суток, соответствует источник нагрева в виде волны с зональным волновым числом $m = 3$. Второй вариант источника для скорости, равной 5 м/с и $T = 45$ суток, соответствует волна с зональным волновым числом $m = 2$.

Верификация источника нагрева

На рис. 3 представлены два варианта источника нагрева атмосферы, полученные с помощью уравнения (1). Путь движения аномалий нагрева был разделен на 8 фаз, которые характеризуют положение аномалий нагрева вдоль экваториального пояса, также как и фазы ИОМД. Условное время перехода от фазы к фазе приблизительно 4 дня для источника И1 с периодом $T = 30$ суток и волновым числом $m = 3$ (рис. 3, а), для источника И2 с $T = 45$ суток и $m = 2$ условное время перехода между фазами приблизительно 5–6 дней (рис. 3, б).

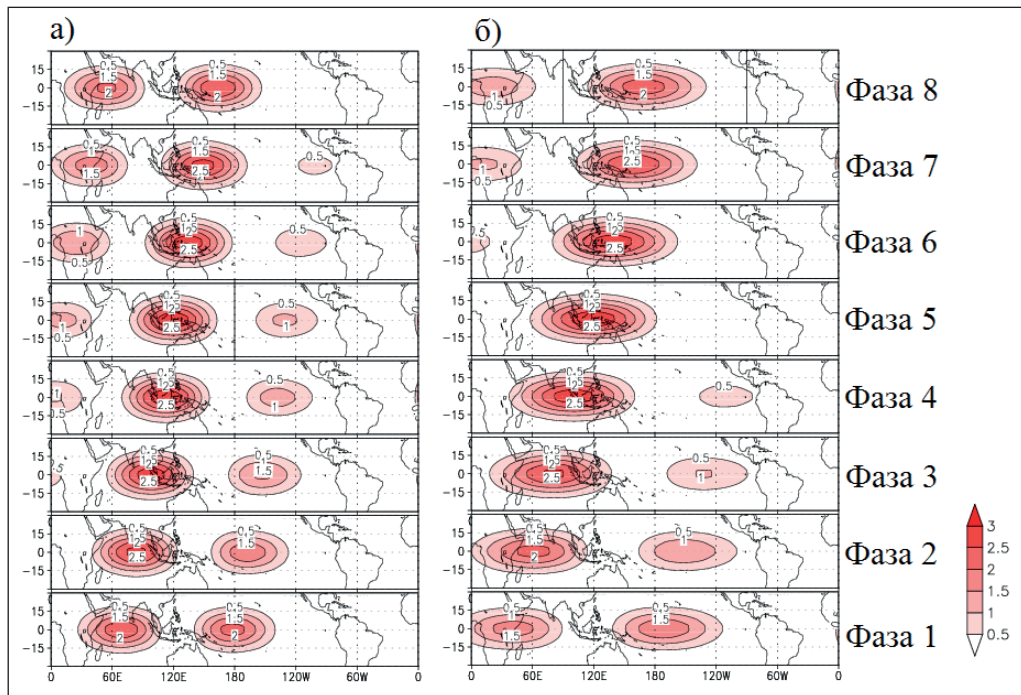


Рис. 3. Распространение аномалий нагрева:
 а — источник нагрева $T = 30$ суток, $m = 3$; б — $T = 45$ суток, $m = 2$

Схема распространения аномалий нагрева, состоящая из 8 фаз, в сравнении с фазовыми переходами зафиксированными ИОМД:

- Во время 1-й фазы модели ОМД, так же как и для 1 фазы ИОМД, наблюдаются 2 ячейки нагрева: зарождающаяся над Индийским океаном и рассеивающая над Тихим океаном.

- В отличие от 2-й и 3-й фаз ИОМД, для которых свойственна только одна ячейка, усиливающая и проходящая над Индийским океаном. Во время 2-й и 3-й фаз модели ОМД наблюдаются 2 ячейки нагрева, первая ячейка нагрева усиливается и движется над Индийским океаном, амплитуда второй ячейки уменьшается, сама ячейка доходит до меридиана смены дат для И1, для И2 она расположится над восточной частью Тихого океана.

- 4-я и 5-я фазы модели ОМД И2 полностью соответствуют 4-й и 5-й фазам ИОМД, где конвективная облачность достигает максимума в развитии и находится в долготном поясе Австралии. Для И1 над Африкой наблюдается зарождающаяся область нагрева, которая, согласно ИОМД, зарождается только на 8-й фазе, слабеющая область нагрева предыдущего цикла доходит до восточной части Тихого океана.

- Во время 6-й фазы область нагрева над Африкой начинает зарождаться и для И2. Развитая область нагрева начинает ослабевать с 6 по 8-ю фазы. К 8-й фазе для И1 максимум рассеивающей области нагрева не доходит до меридиана смены дат, для И2 максимум рассеивающей области проходит через меридиан смены дат, с амплитудой нагрева меньше, чем для И1.

Для следующего этапа верификации модели ОМД вначале необходимо было определить сигнал ОМД в поле нагрева атмосферы, затем сравнить свойства полученного сигнала ОМД с моделью ОМД. Сигнал ОМД может быть представлен как комбинация волн, бегущих на восток с периодом от 15 до 90 суток. Для реализации данной задачи необходимо: 1) разложить поля нагрева на зональные гармоники с помощью спектрального анализа; 2) восстановить временные гармоники, период которых находится в интервале от 15 до 90 суток, отдельно для восточной и западной составляющей волны.

Первый этап обнаружения сигнала ОМД заключается в разложении данных нагрева на зональные гармоники, используя метод наименьших квадратов (МНК). Вычисление зональных гармоник будет проводиться для каждого момента времени t_j .

Задача МНК состоит в минимизации ошибки:

$$\sum_i [s(\lambda_i) - f(\lambda_i)]^2 \rightarrow \min,$$

где $s(\lambda_i)$ — данные нагрева, полученные с помощью параметризационной формулы; $f(\lambda_i)$ — аппроксимирующая функция:

$$f(\lambda_i) = \sum_{n=0}^M [a_n \cos(m_n \lambda_i) + b_n \sin(m_n \lambda_i)] = \sum_{n=0}^M [A_n \cos(m_n \lambda_i - \varphi_n)],$$

где a_n, b_n — неизвестные коэффициенты, при которых сумма квадратов разности реальных данных и значений аппроксимирующей функции будет минимальной; m — зональное волновое число, которое меняется от 1 до 9; A_n и φ_n — амплитуда и фаза гармоники с зональным волновым числом m_n .

Полученные значения амплитуды и фазы A_n и φ_n (или параметров a_n, b_n) для соответствующего зонального числа полностью определяют аппроксимацию функции долготными гармониками.

Второй этап заключается в восстановлении временных гармоник с периодом от 15 до 90 дней для бегущих на восток волн. Для разделения временных рядов на бегущие на восток и запад волны воспользуемся методом, предложенным в работе [6]. Рассмотрим данный метод на примере гармонического колебания:

$$f(t_j, \lambda) = A_n(t_j) \cos[m\lambda - \varphi_n(t_j)]. \quad (2)$$

Для временных рядов с периодом $T = 2\pi/\omega$ на долготах $\lambda = 0, \lambda = 2\pi/4m$ можно записать:

$$f(t, 0) = A_n(0) \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \varphi_n(0)\right); \quad (3)$$

$$f\left(t, -\frac{2\pi}{4m}\right) = A_n\left(-\frac{2\pi}{4m}\right) \cos\left[\frac{2\pi}{T}t - \varphi_n\left(-\frac{2\pi}{4m}\right)\right]. \quad (4)$$

Полученные временные ряды можно представить в виде суперпозиции бегущих на запад и восток волн:

$$f(t, \lambda) = A_{wc} \cos\left(m\lambda + \frac{2\pi}{T}t\right) + A_{ws} \sin\left(m\lambda + \frac{2\pi}{T}t\right) + A_{ec} \cos\left(m\lambda - \frac{2\pi}{T}t\right) + A_{es} \sin\left(m\lambda - \frac{2\pi}{T}t\right), \quad (5)$$

где A_{wc}, A_{ws} — реальная и мнимая части комплексной амплитуды волны бегущей на запад; A_{ec}, A_{es} — реальная и мнимая части для волны, бегущей на восток.

Полагая $(t = 0, \lambda = 0), (t = 0, \lambda = -2\pi/4m), (t = T/4, \lambda = 0), (t = T/4, \lambda = -2\pi/4m)$, получим из (3)–(5) следующие соотношения:

$$\begin{aligned} A_{wc} + A_{ec} &= A_n(0) \cos(\varphi_n(0)); \\ -A_{ws} - A_{es} &= A_n\left(-\frac{2\pi}{4m}\right) \cos\left[\varphi_n\left(-\frac{2\pi}{4m}\right)\right]; \\ A_{ws} - A_{es} &= A_n(0) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_n(0)\right); \\ -A_{wc} - A_{ec} &= A_n\left(-\frac{2\pi}{4m}\right) \cos\left[\frac{\pi}{2} - \varphi_n\left(-\frac{2\pi}{4m}\right)\right]. \end{aligned}$$

Разрешая эту систему относительно A_{wc}, A_{ws}, A_{ec} и A_{es} , получаем

$$A_{wc} = 0,5 \left[A_{Re} \cos(\varphi_{Re}) + A_{Im} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{Im}\right) \right]; \quad (6)$$

$$A_{ws} = 0,5 \left[A_{Re} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{Re}\right) - A_{Im} \cos(\varphi_{Im}) \right]; \quad (7)$$

$$A_{ec} = 0,5 \left[A_{Re} \cos(\varphi_{Re}) - A_{Im} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{Im}\right) \right]; \quad (8)$$

$$A_{es} = -0,5 \left[A_{Re} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{Re}\right) + A_{Im} \cos(\varphi_{Im}) \right], \quad (9)$$

где $A_{Re} = A_n(0)$; $\varphi_{Re} = \varphi_n(0)$; $A_{Im} = A_n(-2\pi/4m)$; $\varphi_{Im} = \varphi_n(-2\pi/4m)$.

Выражения для амплитуд и фаз волн, бегущих на запад и восток, можно записать следующим образом:

$$A_{west} = \sqrt{A_{ws}^2 + A_{wc}^2}; \quad \varphi_{west} = \arctan\left(\frac{A_{ws}}{A_{wc}}\right);$$

$$A_{east} = \sqrt{A_{ec}^2 + A_{es}^2}; \quad \varphi_{east} = \arctan\left(\frac{A_{es}}{A_{ec}}\right).$$

Определить масштабно-временные компоненты, образующие гармоническое колебание (2), можно, применив вейвлет-преобразование данного ряда. Было выбрано комплексное вейвлет-преобразование Морле, которое представляет собой набор косинусов и синусов, промодулированных гауссоидой [12]. В результате вейвлет-преобразования получаем массив амплитуд и фаз действительной и мнимой составляющих временного ряда. Подставив в уравнение (6) — (8) вместо A_{Re} и φ_{Re} , A_{Im} и φ_{Im} значения амплитуды и фазы вейвлет-преобразования действительной и мнимой части временного ряда соответственно, можем произвести процедуру восстановления временного ряда для волн, бегущих на запад и восток с учетом колебаний в интервале 15–90 суток.

На рис. 4 показаны восстановленные временные гармоники на широте экватора для волн, бегущих на запад, с зональным волновым числом $m = 1, 2, 3, 4$ (рис. 4, а), и для волн, бегущих на восток (рис. 4, б), с ноября 2007 по апрель 2008 г. Восстановление временных рядов проводилось для колебаний с периодами от 15 до 90 дней на широте экватора на высоте 7 км.

Для определения сигнала ОМД по данным о нагреве выбраны года (ноябрь — апрель 2002–2003, 2007–2008, 2009–2010, 2011–2012), в которые интенсивность ОМД, согласно ИОМД, классифицируется как «сильная» (циклы ОМД, в которые присутствуют значения амплитуды ИОМД больше 2). В табл. 1 представлены циклы ОМД с периодами от 30 до 60 дней, в которые наблюдается последовательность перехода от 1-й к 8-й фазе ИОМД в рассматриваемые годы (начало некоторых циклов захватывает октябрь). Табличные данные предназначены для сравнения сигнала ОМД, полученного комбинированием волн, бегущих на восток, с сигналом ОМД по ИОМД.

Таблица 1

Циклы ОМД, полученные на основе ИОМД

Годы (ноябрь — апрель)	Наблюдаемые циклы ОМД			
	1	2	3	4
2002–2003	25.10.2002–9.12.2002	10.12.2002–20.01.2003		
2007–2008	18.10.2007–3.12.2007	4.12.2007–22.01.2008	23.01.2008– 29.02.2008	01.03.2008– 09.04.2008
2009–2010	29.10.2009–09.12.2009	23.12.2009–16.02.2010		
2011–2012	17.11.2011–12.12.2011 (движение ОМД с 1-й по 5-ю фазу)	13.12.2011–03.02.2012 (хаотичные переходы от фазы к фазе, в основном 2-я половина цикла)	04.02.2012– 12.02.2012 (ОМД в 7-й и 8-й фазах)	13.02.2012– 10.04.2012

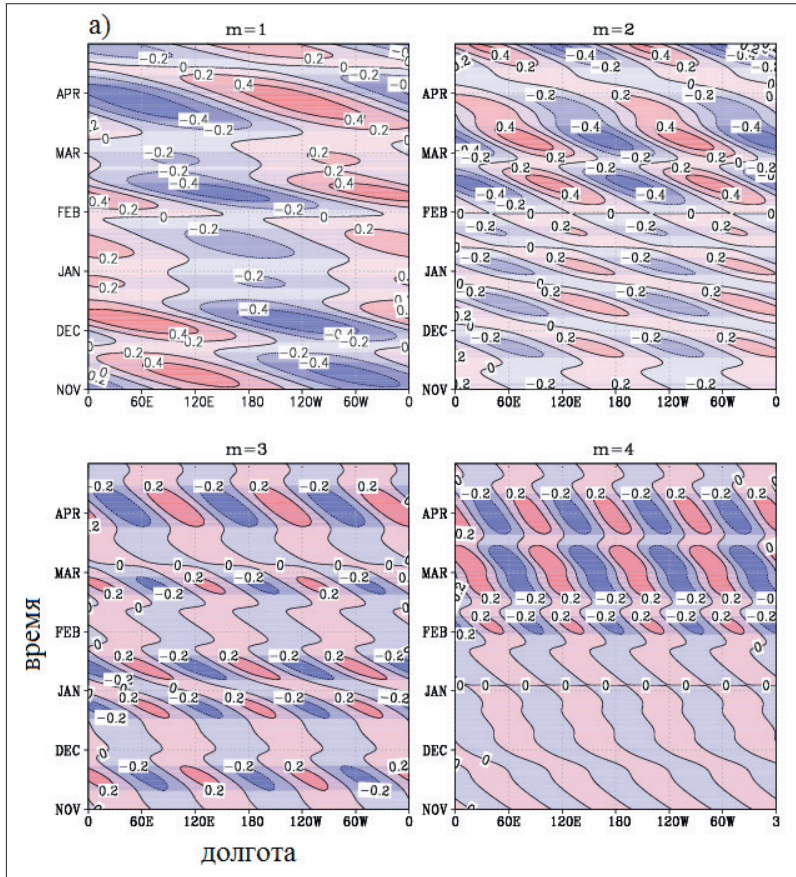


Рис. 4. Восстановленные временные гармоники волн, бегущих на запад (а), и волн, бегущих на восток (б), для $m = 1-4$

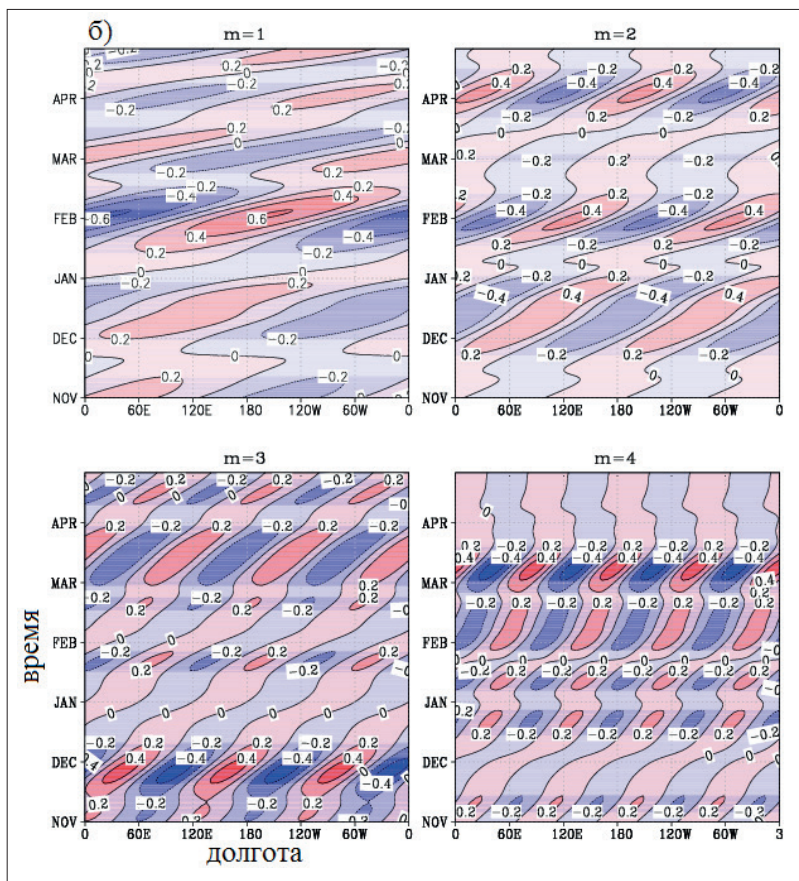


Рис. 4. Восстановленные временные гармоники волн, бегущих на запад (а), и волн, бегущих на восток (б), для $m = 1-4$

На рис. 5 представлены диаграммы распространения аномалий нагрева на восток на широте экватора за 2007–2008 гг. в холодный период, отличие диаграмм состоит в разном количестве учтенных гармоник. В рассматриваемый период наблюдалось три полных цикла ОМД (табл. 1).

На диаграмме «а» (см. рис. 5) сигнал ОМД — это сумма первых четырех гармоник, бегущих на восток. Сигналы ОМД — три вытянутых овала, заштрихованных красным цветом, в долготном поясе от 20° до 220° в. д. Даты начала и конца циклов осцилляции приблизительно совпадают с датами, указанными в табл. 1. На диаграммах рис. 5 видно, что увеличение количества гармоник, образующих сигнал ОМД, не влияет на общую зональную протяженность распространения аномалий нагрева. С увеличением количества гармоник меняется структура распределения аномалий и увеличивается амплитуда нагрева. От сигнала $m = 1-5$ (диаграмма «б») до сигнала $m = 1-9$ (диаграмма «е») происходит только постепенное увеличение зональной протяженности максимальной наблюдаемой амплитуды

1,2 К/сут. в этот период. Подобный анализ различных комбинаций гармоник был проведен для других рассмотренных лет, лучшей комбинацией был набор гармоник $m = 1-9$, который соответствует данным наблюдений.

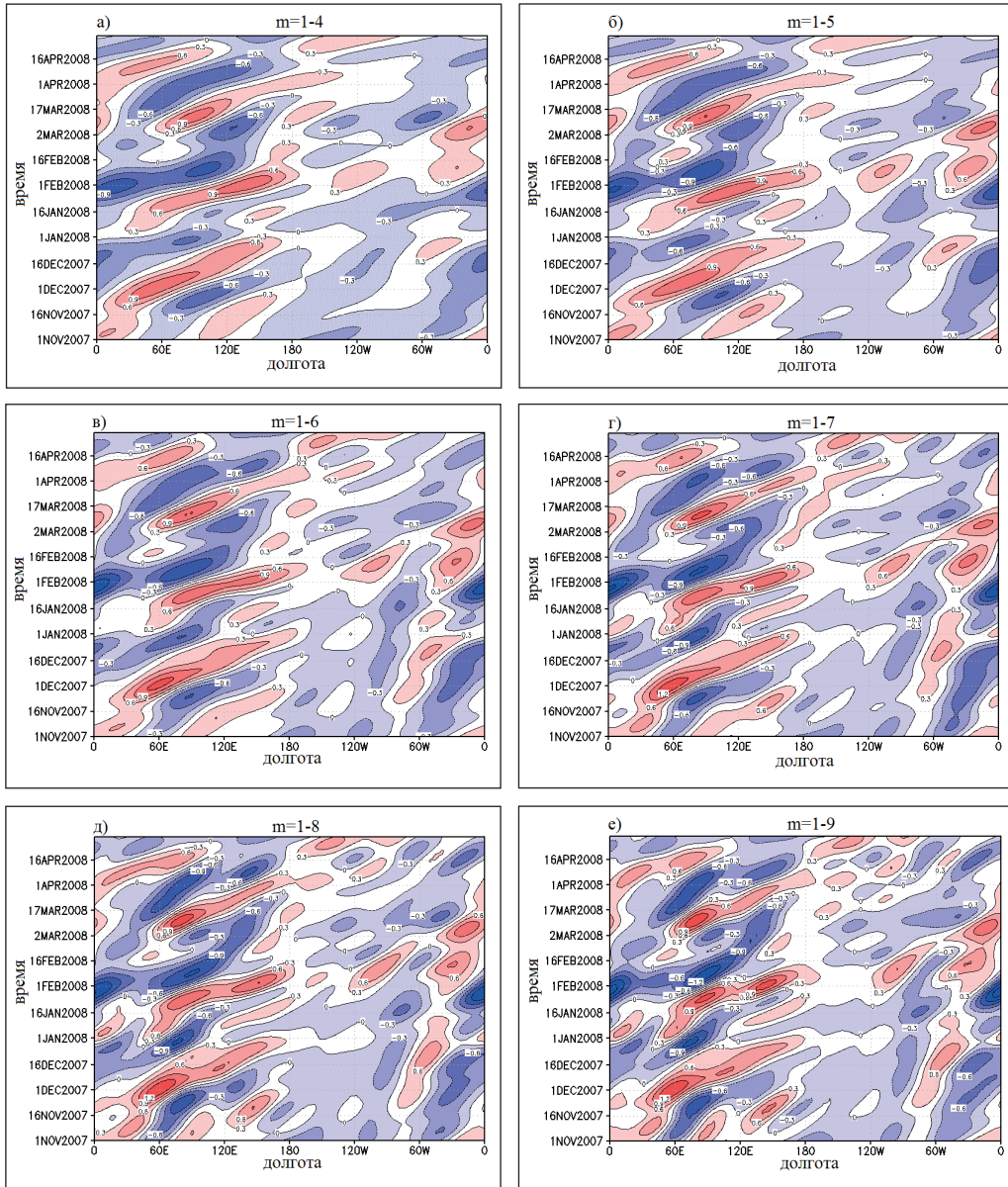


Рис. 5. Комбинации волн, бегущих на восток, для периода с ноября по апрель 2007–2008 гг.:
 а — сумма восточных составляющих волн с зональным волновым числом m от 1 до 4;
 б — m от 1 до 5; в — m от 1 до 6; г — m от 1 до 7; д — m от 1 до 8; е — m от 1 до 9

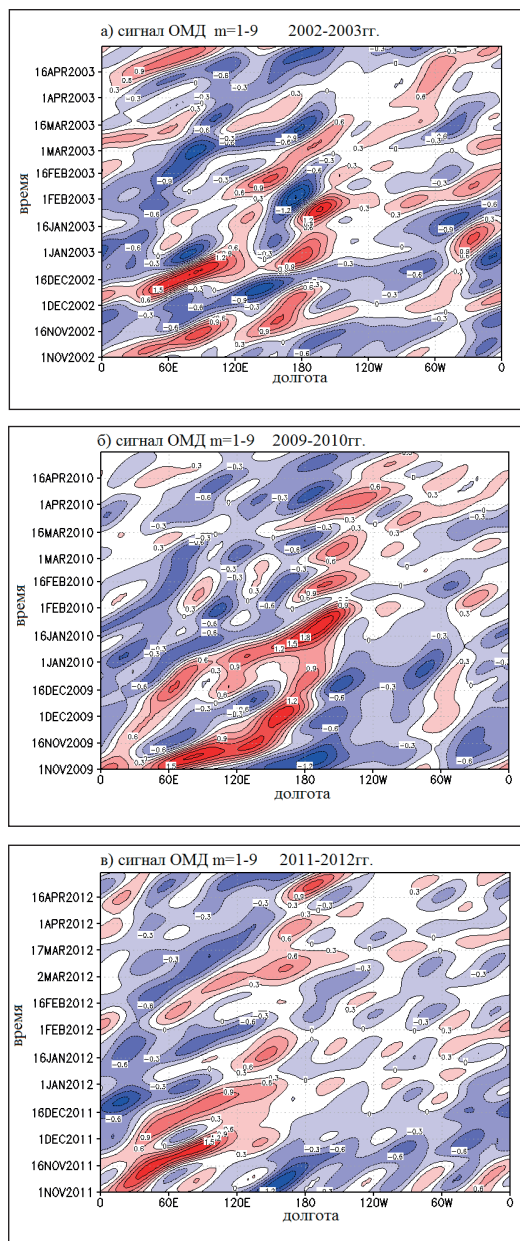


Рис. 6. Диаграммы распределений нагрева, соответствующие сумме первых девяти гармоник волн, бегущих на восток: *a* — для периода 2002–2003 гг.; *б* — для периода 2009–2010 гг.; *в* — для периода 2011–2012 гг.

Сигналы ОМД в поле нагрева атмосферы, представляющие первые 9 гармоник, бегущих на восток, были получены для холодных периодов 2002–2003 гг., 2009–2010 гг., 2011–2012 гг. На долготно-временных диаграммах рис. 6 представлены сигналы ОМД: *a* — для периода 2002–2003 гг.; *б* — для периода 2009–2010 гг.; *в* — для периода 2011–2012 гг. На всех диаграммах рис. 6 наблюдаются сигналы ОМД приблизительно в тех же периодах, что и для циклов ОМД, указанных в табл. 1.

В табл. 2 собрана информация об ОМД, в которых максимальное значение нагрева не меньше 1,2 К/сут. (они соответствуют циклам ОМД, в которых амплитуда ИОМД больше 2), указаны даты начала и конца распространения аномалий, оценена фазовая скорость в зависимости от зональной протяженности сигнала и от периода распространения. За начало ОМД принимался день начала развития аномалий нагрева с 0,3 К/сут. в области от 0° до 60° в. д. (область зарождения ОМД), дата конца сигнала ОМД соответствует дню, в котором наблюдается уменьшение нагрева с 0,3 К/сут. в области восточного Тихого океана.

По результатам, приведенным в табл. 2, можно вычислить среднюю фазовую скорость, которая приблизительно равна 5 м/с, средняя протяженность распространения аномалий — около 180° долготы, средний период колебания — 46 дней, средняя амплитуда — 1,5 К/сут. На рис. 7 изображены диаграммы распределения аномалий нагрева вдоль экватора для И1 и И2. Зональная длина распределения аномалий для И1 около 120° долготы, для И2 — около 180° долготы. Среднее значение амплитуды нагрева для

сигнала ОМД совпадает с амплитудой модели ОМД, но максимумы у сигналов ОМД не всегда локализованы на 120° в. д.

Таблица 2

Сигнал ОМД и его показатели

Сигнал ОМД	Период сигнала ОМД (дни)	Зональная протяженность (градусы)	Фазовая скорость (м/с)	Амплитуда нагрева (К/сут.)
1.11.2002–16.12.2002	46	200	5,58	1,2
1.12.2002–2.02.2003	60	250	5,35	1,8
25.11.2007–1.01.2008	37	150	5,18	1,2
1.01.2008–15.02.2008	45	180	5,12	1,2
2.03.2008–8.04.2008	38	120	4,04	1,2
1.11.2009–16.12.2010	46	180	5	1,8
1.12.2010–1.02.2010	60	180	3,84	1,8
1.11.2011–8.12.2012	38	150	5,05	1,5

Заключение

В процессе образования облачности происходит выделение скрытого тепла конденсации. Нагрев атмосферы, генерируемый ОМД, модулирует глобальную циркуляцию атмосферы. Для моделирования влияния ОМД на динамические процессы в высоких широтах была реализована модель ОМД и проведена ее верификация. Модель теплового источника ОМД будет включена в модель средней и верхней атмосферы (МСВА) [2], как дополнительный нагрев в тропиках. Анализ распределения скрытого тепла конденсации позволил определить трехмерные пространственно-временные особенности данных нагрева атмосферы. На основе свойств ОМД и профилей скрытого тепла была создана модель ОМД.

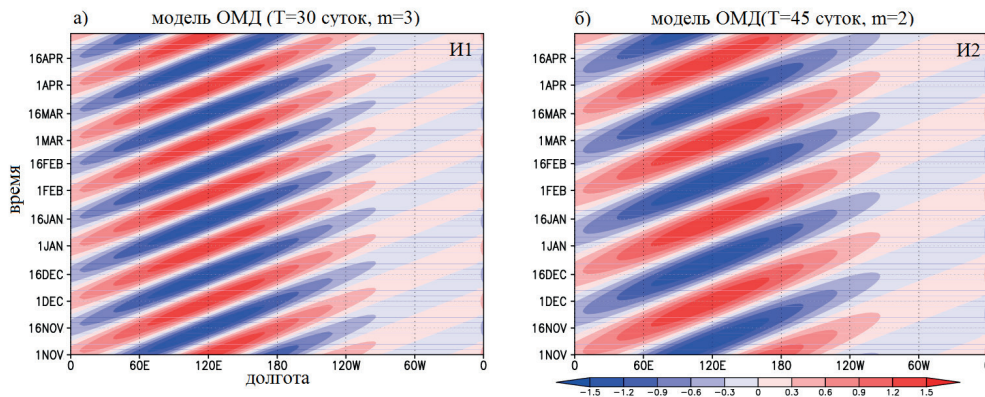


Рис. 7. Диаграммы распределения аномалий нагрева для модельных источников ОМД над экватором на высоте 7 км: а — для И1; б — для И2

Модель ОМД — это движущийся вдоль экватора в восточном направлении источник нагрева. Из проведенного анализа можно сделать вывод о том, что аномалии нагрева не распространяются дальше 15° широты, с максимальными значениями амплитуды нагрева $1,5$ К/сут. на долготе 120° в. д. и высоте 7 км. Модель ОМД представлена в двух вариантах — колебания с периодами 30 суток (И1) и 45 суток (И2). В работе проведен сравнительный анализ между этапами распространения области нагрева модели ОМД и 8 фазами ИОМД. Неточностями воспроизведения областей нагрева И1 в сравнении с ИОМД являются заблаговременность развития нового цикла ОМД и непрерывающийся в течение всего периода процесс рассеивания аномалий нагрева предыдущего цикла. Разногласием в процессах развития и движения аномалий между фазами И2 и ИОМД является заблаговременное (на 2 фазы ранее) развитие области нагрева нового цикла у И2.

В работе предложен метод идентификации сигнала ОМД в поле нагрева атмосферы для верификации модели ОМД. Идея метода идентификации сигнала ОМД в данных скрытого тепла заключалась в подборе количества гармоник восточной составляющей волны, образующих сигнал ОМД. Сигнал ОМД, состоящий из гармоник от $m = 1$ до 9 , был выбран подходящим, т. к. больше соответствует данным наблюдений. Исследование полученных сигналов ОМД для четырех выбранных лет показало, что данный метод определения сигнала ОМД хорошо захватывает осцилляцию, как и ИОМД. Сильные сигналы ОМД — это события, в которых присутствует амплитуда больше $1,2$ К/сут. Анализ сильных сигналов ОМД (табл. 2) показал, что средняя продолжительность сигнала ОМД — около 46 суток, они имеют значительную зональную протяженность вдоль экваториального пояса в среднем около 180° долготы, средняя фазовая скорость колебания — около 5 м/с, средняя амплитуда — $1,5$ К/сут.

Полученные результаты, характеризующие сигналы ОМД, совпадают по большим показателям с И2 (амплитуда нагрева, период осцилляции, зональная протяженность). В дальнейшей работе модель ОМД с параметрами И2 будет включена в модель МСВА для исследования влияния ОМД на процессы в средних и высоких широтах.

Литература

1. Генерация и распространение низкочастотных атмосферных возмущений зимой в Северном полушарии / В.И. Мордвинов, Е.В. Девятова, О.С. Кочеткова и др. // Учен. зап. РГГМУ. 2011. № 20. — С. 90–102.
2. Погорельцев А.И. Генерация нормальных атмосферных мод стратосферными вассилляциями // Изв. РАН, Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 4. — С. 463–475.
3. Смышляев С.П., Погорельцев А.И., Дробашевская Е.А., Канухина А.Ю. Влияние динамических факторов на озоновые аномалии в Арктике // Учен. зап. РГГМУ. 2015. № 41. — С. 136–148.
4. Bao M., Hartmann D.L. The response to MJO-like forcing in a nonlinear shallow-water model. // Geophys. Res. Lett. 2014. Vol. 41. — P. 1322–1328. — DOI:10.1002/2013GL057683.
5. Barnes H.C., Zuluaga M.D., Houze R.A. Latent heating characteristics of the MJO computed from TRMM observations. // J. Geophys. Res. Atmos. 2015. Vol. 120. — P. 1322–1334. — DOI:10.1002/2014JD022530.
6. Fedulina, I.N., Pogoreltsev A.I., Vaughan G. Seasonal, interannual and short-term variability of planetary waves in UKMO assimilated fields // Q.J. Roy. Meteorol. Soc. 2004. V. 130. No. 602. — P. 2445–2458.

7. *Hong S.S., Wang P.H.* On the thermal excitation of atmospheric tides. // *Bull. Geophys.* 1980. Vol. 19. — P. 56–84.
8. *Madden R.A., Julian P.R.* Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific // *J. Atmos. Sci.* 1971. Vol. 28. — P. 702–708.
9. *Rienecker; M.M., et al.* MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. // *J. Climate.* 2011. V. 14. — P. 3624–3648. — DOI:10.1175/JCLI-D-11-00015.1.
10. *Torrence Ch., Compo G.P.* A practical guide to wavelet analysis // *Bulletin of American Meteorological Society* 79. 1998. — P. 61–78.
11. *Wheeler M., Hendon H.H.* An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction // *Mon. Weather Rev.* 2004. Vol. 132. — P. 1917–1932.
12. *Xianan J. and et al.* Vertical diabatic heating structure of the MJO: Intercomparison between recent reanalyses and TRMM estimates. // *Mon. Weather Rev.* 2011. Vol. 139. — P. 3208–3223.
13. *Zhang C.* Madden-Julian Oscillation. // *Rev. Geophys.* 2005. Vol. 43. № RG2003. — DOI: 10.1029/2004RG000158.
14. MERRA data [Электронный ресурс] // URL: https://disc.sci.gsfc.nasa.gov/mdisc/data-holdings/merra/merra_products_nonjs.shtml (дата обращения: 30.03.2017).
15. RMM data [Электронный ресурс] // URL: <http://www.bom.gov.au/climate/mjo/graphics/rmm.74to-Realtime.txt> (дата обращения: 30.03.2017).