

УДК 551.513(203.5+203.7+211)

ВЛИЯНИЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ МАДДЕНА — ДЖУЛИАНА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ И СТРУКТУРУ ПОЛЯРНОГО ВИХРЯ

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

Российский государственный гидрометеорологический университет,
kanykeikandieva@gmail.com

Рассмотрено влияние осцилляции Маддена — Джулиана (ОМД) на циркуляционные процессы стратосферы средних и полярных широт Северного полушария. Проведен сравнительный анализ изменчивости характеристик полярного вихря и положения конвективных зон, связанных с фазами ОМД. Исследовано воздействие ОМД на поля геопотенциальной высоты в полярной области.

Ключевые слова: осцилляция Маддена — Джулиана, взаимодействие стратосферы и тропосферы, полярный вихрь.

INFLUENCE OF THE MADDEN — JULIAN OSCILLATION ON THE POLAR VORTEX

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

Russian State Hydrometeorological University

Impact of the Madden — Julian oscillation (MJO) on dynamical processes of polar stratosphere of the North Pole is considered in this article. The comparative analysis of variability of the polar vortex characteristics and convective zone position associated with the MJO phases is performed. Influence of MJO on the geopotential height fields in the polar region is explored.

Keywords: Madden — Julian oscillation, troposphere-stratosphere interaction, polar vortex.

Введение

Изменение динамических процессов в стратосфере полярных широт является причиной образования планетарных волн, направленных в тропосферу, которые влияют на формирование погоды и климата [2]. Исследование процессов, связанных с развитием и эволюцией стратосферных динамических возмущений (например, внезапных стратосферных потеплений, ВСП), которые, в свою очередь, влияют на концентрацию и возникновение аномалий озона [1], является важной и актуальной задачей.

Одним из процессов, воздействующих на циркуляцию стратосферы, является осцилляция Маддена — Джулиана (ОМД). ОМД — тропическое колебание, проявляющиеся в осциллирующем движении конвективной облачности в восточном направлении со средней скоростью 5 м/с. Наблюдаемый период этой осцилляции составляет 30—60 дней [6].

В работе [10] цикл ОМД разбит на восемь фаз. Среднее время перехода между каждой фазой составляет шесть дней. Каждой фазе ОМД соответствует определенное положение конвективной облачности вдоль экваториального пояса от западной части Индийского океана до центральной части Тихого океана. Во время 1-й и 8-й фазы наблюдаются две ячейки облачности — развивающаяся ячейка над Африкой / западной частью Индийского океана и рассеивающаяся над восточной частью Тихого океана. Во время 2-й и 3-й фазы одна облачная ячейка перемещается на восток над Индийским океаном. Во время 4-й и 5-й фазы облачность находится в долготном поясе над Австралией. Во время 6-й и 7-й фазы облачная ячейка перемещается на восток по направлению к центральной части Тихого океана.

Возмущения, генерируемые ОМД в экваториальной тропосфере, распространяются в виде субтропических планетарных волн, перемещающихся по направлению к полюсам [5, 7]. Источником волн является конвективная неустойчивость. Возмущения давления, связанные с этим источником, усиливаются благодаря выделению тепла при конденсации, особенно в случае глубокой проникающей влажной конвекции.

Garfinkel [4] предположил, что возмущения, генерируемые ОМД в области западной части Тихого океана, могут воздействовать на алеутскую депрессию. Отрицательные аномалии давления (инициируемые конвекцией) способствуют углублению барической ложбины и усиливают меридиональные потоки тепла в тропосфере и стратосфере, что приводит к повышению температуры в высоких широтах и ослаблению полярного вихря. Уменьшение интенсивности полярного вихря совпадает с 7-й фазой ОМД, а во время 3-й фазы ОМД наблюдается противоположный эффект. Положительные аномалии давления, наблюдаемые во время 3-й фазы ОМД над западной частью Тихого океана, усиливают барический гребень, находящийся в этой области океана, что приводит к блокированию распространения возмущений и усилению полярного вихря. Степень воздействия ОМД на стратосферный полярный вихрь в Северном полушарии может быть сравнима с влиянием квазидвухлетнего колебания зонального потока в тропической стратосфере и явления Эль-Ниньо / Южное колебание [4].

В работе Weare [9] исследована меридиональная циркуляция возмущений, генерируемых ОМД в тропосфере и нижней стратосфере, и выявлено существование двух возможных чередующихся типов отклика на ОМД в стратосфере высоких широт. При одном из них возмущения распространяются от экватора по направлению к полюсу в тропосфере, а в области умеренных широт поднимаются в стратосферу. При другом типе отклика вертикальные потоки направлены из тропической / субтропической тропосферы в стратосферу средних широт и уже в стратосфере перемещаются по направлению к полюсу.

Целью настоящей работы является исследование изменчивости стратосферного полярного вихря под воздействием экваториального тропического колебания ОМД. Актуальность задачи определяется важностью исследования и понимания процессов, ответственных за стратосферно-тропосферное взаимодействие, учет которых может позволить повысить качество долгосрочных прогнозов погоды.

Данные и метод

Анализ изменчивости стратосферы проводился с помощью двух параметров — индекса интенсивности вихря (ИВ) и площади полярного вихря (ПВ).

Индекс ИВ аналогичен суточному зональному значению индекса NAM (North Atlantic Mode) [3], который используется для оценки стратосферной изменчивости.

Для вычисления ИВ и ПВ использованы данные о геопотенциальной высоте и зональном ветре реанализа MERRA (Modern Era Retrospective Analysis for Research and Applications) [8]. Для получения массивов данных реанализа MERRA применяется современная система усвоения данных GEOS-5 (Goddard Earth Observing System Data Assimilation System Version 5), которая включает в себя современные системы наблюдения. Большое число параметров реанализа, интегрированных в массив MERRA, обеспечивают хорошую базу для изучения изменчивости климата. Данные MERRA схожи с другими глобальными массивами реанализа, но с несколькими ключевыми преимуществами, такими как более высокое разрешение по времени и по пространству, чем у аналогов. Данные ассимилированы в регулярную горизонтальную сетку с разрешением 1,25 на 1,25° по широте и долготе.

Анализ произведен для холодного сезона (ноябрь — апрель) периода 1985—2015 гг. с шагом 24 часа на десяти изобарических поверхностях в стратосфере.

Ежедневные значения индекса ИВ (Z_p) определялись по формуле

$$Z_p = \sum (Z' \cos \varphi) / \sum \cos \varphi,$$

где Z' — отклонения геопотенциальной высоты от климатического значения, φ — широта, суммирование производится по всем точкам региона севернее 65° с.ш. Ежедневные значения площади ПВ определялись как площадь ячеек сетки, в которых завихренность отрицательна.

Для исследования влияния ОМД на параметры стратосферной циркуляции использован ежедневный индекс ОМД (ИОМД), разработанный Wheeler и Hendon [10]. Данные о ИОМД получены по данным Австралийского метеорологического бюро. Данные о скорости зонального ветра в верхней и нижней тропосфере (200 и 850 гПа) и данные об уходящем длинноволновом излучении (показатель облачности) используются для вычисления индекса. Два первых компонента разложения по естественным ортогональным функциям определяют ежедневную амплитуду и фазу ОМД (мощность и положение облачности).

Результаты

Два параметра ИОМД — амплитуда и фаза — характеризуют ежедневные изменения метеорологических параметров тропической области, связанные с ОМД. Амплитуда (A) индекса ОМД — показатель интенсивности явления. По величине амплитуды события ОМД делят на «слабые события» ($A < 1$), и «сильные события» ($A > 1$). Фаза ИОМД — показатель положения облачности вдоль экваториального пояса.

Для анализа активности ОМД в различные фазы исследуемого периода (всего 5618 дней) были выделены дни наблюдения разной фазы и амплитуды ИОМД. В табл. 1 приведены полученные результаты.

Таблица 1

Число дней пребывания ОМД в каждой фазе

Фаза	Общее число дней	$A < 1$	$A > 1$
1	547	202	345
2	644	239	405
3	756	223	533
4	757	258	499
5	726	260	466
6	775	258	517
7	774	269	505
8	639	221	418

Из анализа табл. 1 видно, что в среднем доля «сильных событий» ОМД составляет 65 %, а доля «слабых событий» ОМД — 35 %. Большое число дней скопление облачности, связанное с ОМД, наблюдается над восточной частью Индийского океана (3-я фаза) (см. табл. 1, 4-й столбец).

Для установления взаимосвязи между тропической осцилляцией Маддена — Джулиана и интенсивностью стратосферного полярного вихря были рассчитаны средние значения индекса ИВ для каждой фазы ОМД. Положительные значения индекса ИВ указывают на слабый вихрь, отрицательные — на сильный вихрь. Полученные результаты представлены на рис. 1.

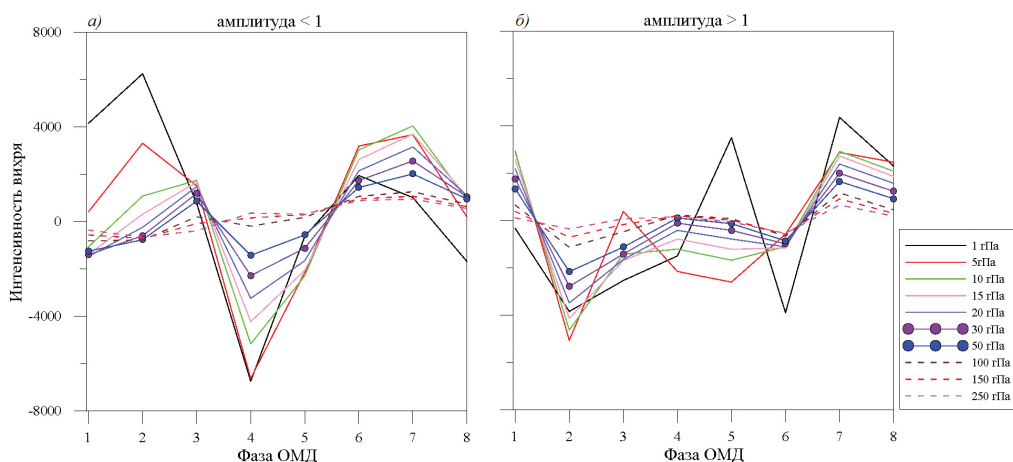


Рис. 1. Кривые зависимости среднего значения индекса ИВ от фазы ОМД.
а — для «слабых событий» ОМД ($A < 1$), б — для «сильных событий» ОМД ($A > 1$).

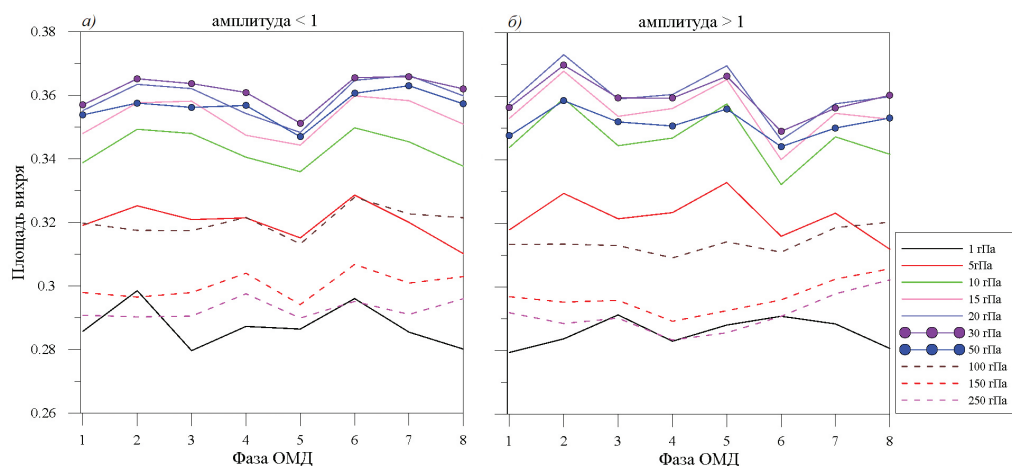


Рис 2. Кривые зависимости среднего значения площади полярного вихря, нормированной на квадрат среднего радиуса Земли, от фазы ОМД.

a — для «слабых событий» ОМД ($A < 1$), *б* — для «сильных событий» ОМД ($A > 1$).

Анализ связи индекса ИВ и фазы ОМД позволяет сделать вывод о том, что зависимость имеет одинаковую структуру во всей стратосфере за исключением уровней в верхней стратосфере 5 и 1 гПа. Во время слабых событий ОМД в тропиках (см. рис. 1 *a*) стратосферный полярный вихрь постепенно ослабляется с 1-й по 3-ю и с 4-й по 7-ю фазу. Во время 4-й и 8-й фазы наблюдается тенденция увеличения интенсивности вихря. В верхней стратосфере (5 и 1 гПа) во время 1-й и 2-й фазы интенсивность вихря значительно меньше, чем в нижележащем слое стратосферы.

Во время сильных событий ОМД в тропиках (см. рис. 1 *б*) в нижней и средней стратосфере число фаз с отрицательными значениями индекса возрастает по сравнению с результатами, полученными для индекса ИВ во время слабых событий ОМД (см. рис. 1 *a*). Сильный полярный вихрь приходится на 2-ю фазу и постепенно ослабевает к 7-й фазе. Тенденция увеличения индекса ИВ наблюдается после 8-й и 1-й фаз.

В верхней стратосфере во время сильных событий ОМД зависимость индекса ИВ от фазы ОМД не совпадает с общим ходом. На изобарической поверхности 5 гПа значительное увеличение индекса наблюдается во время 3-й фазы, а на 1 гПа — во время 5-й фазы, что соответствует уменьшению интенсивности полярного вихря. На обеих изобарических поверхностях слабый вихрь наблюдается и во время 7-й фазы.

Для исследования взаимосвязи ОМД и циркуляции стратосферы были вычислены ежедневные значения площади полярного вихря. На рис. 2 приведены графики зависимости площади ПВ от фазы ОМД.

Анализ результатов, приведенных на рис. 2 *a*, позволяет сделать вывод о том, что площадь вихря достигает максимума на поверхности 30 гПа, минимальное значение площади вихря приходится на 5-ю фазу.

Во время сильных событий ОМД в тропической области (см. рис. 2 б) максимальная площадь вихря наблюдается на 20 гПа. В верхней стратосфере на поверхности 1 гПа площадь вихря незначительно увеличивается во время 3-й и 6-й фазы. Во время стадии развития и активной стадии ОМД (с 1-й по 5-ю фазу) площадь вихря в слое от 30 до 5 гПа увеличивается по сравнению со средними значениями площади вихря во время слабого воздействия ОМД. Максимальные значения площади приходятся на 1-ю и 5-ю фазу ОМД, минимальное значение наблюдается во время 6-й фазы. Площадь ПВ в слое от 50 до 100 гПа уменьшается по сравнению с площадью ПВ во время слабого воздействия ОМД. В нижней стратосфере, в слое от 250 до 150 гПа, с 1-й по 3-ю фазу наблюдается тенденция сокращения площади вихря, а с 4-й по 8-ю — тенденция увеличения площади вихря.

Из представленного анализа можно предположить, что определенные ИОМД положения конвективной облачности вдоль экваториального пояса по-разному воздействуют на интенсивность и площадь полярного вихря. Соответственно, структура аномалий геопотенциальной высоты в полярной области (аномалии определяются как отклонения геопотенциальной высоты от климатического значения в рассматриваемый момент времени) во время отдельной фазы ОМД будет различаться. Распределения аномалий геопотенциальной высоты, соответствующие различным фазам ОМД, были рассчитаны для всех исследуемых изобарических поверхностей. Было установлено, что поля аномалий в слое от 250 до 10 гПа имеют схожую форму. Для анализа полученных аномалий полей геопотенциальной высоты в нижней стратосфере была выбрана поверхность 150 гПа (рис. 3).

Расположение аномалий геопотенциальной высоты, полученные во время слабого и сильного воздействия ОМД, не совпадает ни в одну из фаз ОМД, что позволяет сделать вывод о влиянии ОМД на динамические процессы в стратосфере. Рисунок 3 б демонстрирует аномалии геопотенциальной высоты на изобарической поверхности 150 гПа, полученные для восьми фаз ОМД во время сильных событий осцилляции. Схему изменения поля геопотенциальной высоты из-за воздействия ОМД можно представить следующим образом.

Во время 1-й фазы аномалии геопотенциальной высоты имеют вид волны с зональным волновым числом 2 и с двумя центрами положительных аномалий — над центральной частью России и над Северной Америкой. Одна из областей отрицательных аномалий располагается между Гренландией и Скандинавией, а вторая — над северо-восточной Сибирью.

Во время 2-й фазы область отрицательных аномалий распространяется почти по всему Северному полушарию; небольшая область положительных аномалий располагается над Гренландией и Скандинавией.

Во время 3-й фазы над западной частью Тихого океана появляются положительные аномалии геопотенциальной высоты (см. рис. 3 а, 3 б, фаза 3). Центр отрицательных аномалий усиливается и смещается на север в область центральной части России. Возможно, это изменение можно объяснить с помощью механизма, предложенного в работе [4]. Во время 3-й фазы ОМД над западной частью Тихого океана наблюдаются высокие значения аномалии давления, в результате чего усиливается барический гребень в Тихом океане, что приводит к процессу блокирования распространения возмущений и усилению полярного вихря.

Во время 4-й фазы область положительных аномалий достигает центральной части Тихого океана. Центр области отрицательных аномалий находится над Гренландией.

Во время 5-й и 6-й фазы происходит уменьшение области охвата и величины отрицательных аномалий геопотенциальной высоты. Центр отрицательных аномалий расположен над северной частью Канады.

Во время 7-й фазы поле аномалий имеет вид волны с зональным волновым числом 1. Центр положительных аномалий находится над Канадой, центр отрицательных аномалий — над северо-восточной частью Евразии.

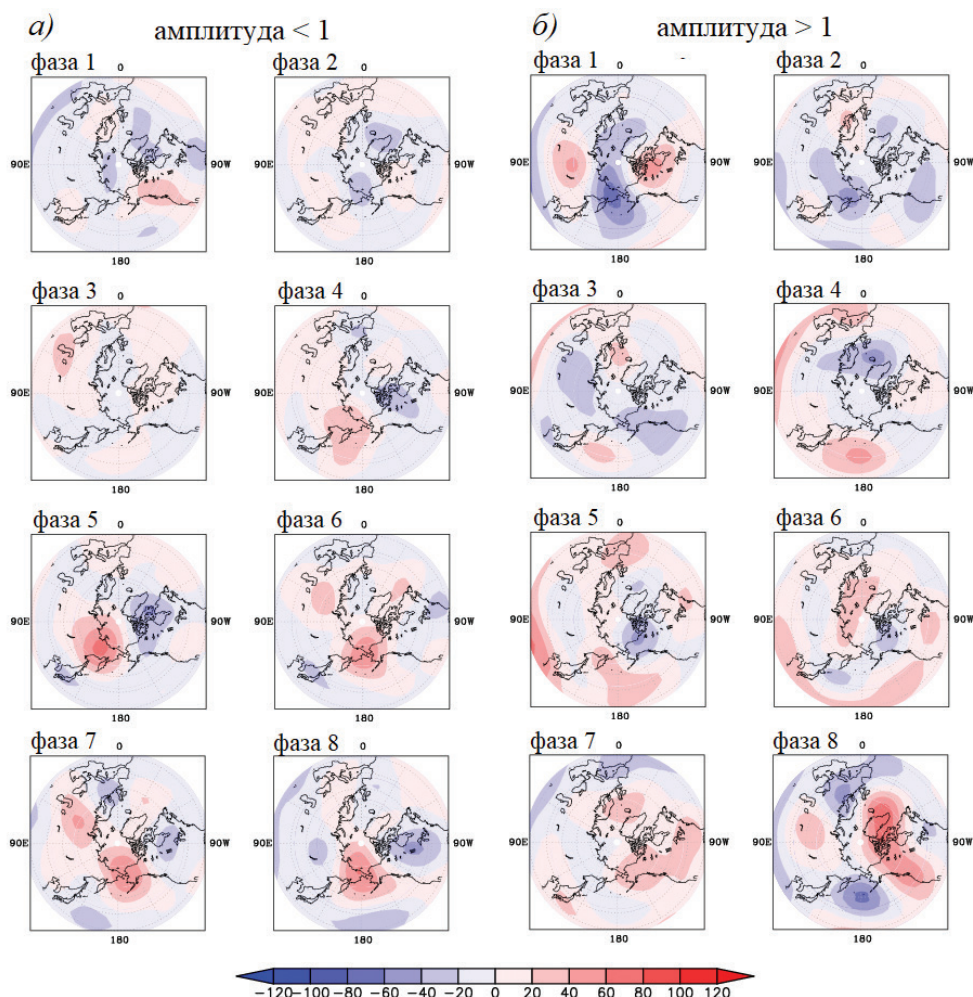


Рис. 3. Распределение аномалий геопотенциальной высоты (м) на изобарической поверхности 150 гПа в зависимости от фазы ОМД.
 а — для «слабых событий» ОМД ($A < 1$), б — для «сильных событий» ОМД ($A > 1$).

К 8-й фазе зона отрицательных аномалий расширяется над северной частью Тихого океана, величина отрицательных аномалий уменьшается, аномалии имеют вид волны с зональным волновым числом 2.

Было проведено исследование поля геопотенциальной высоты и в верхней стратосфере, на изобарической поверхности 1 гПа. На рис. 4 представлены полученные результаты распределения аномалий геопотенциальной высоты для фаз ОМД во время сильных и слабых событий осцилляции Маддена — Джулиана.

Расположение аномалий геопотенциальной высоты в верхней стратосфере во время сильных и слабых ОМД различается — это позволяет предположить, что

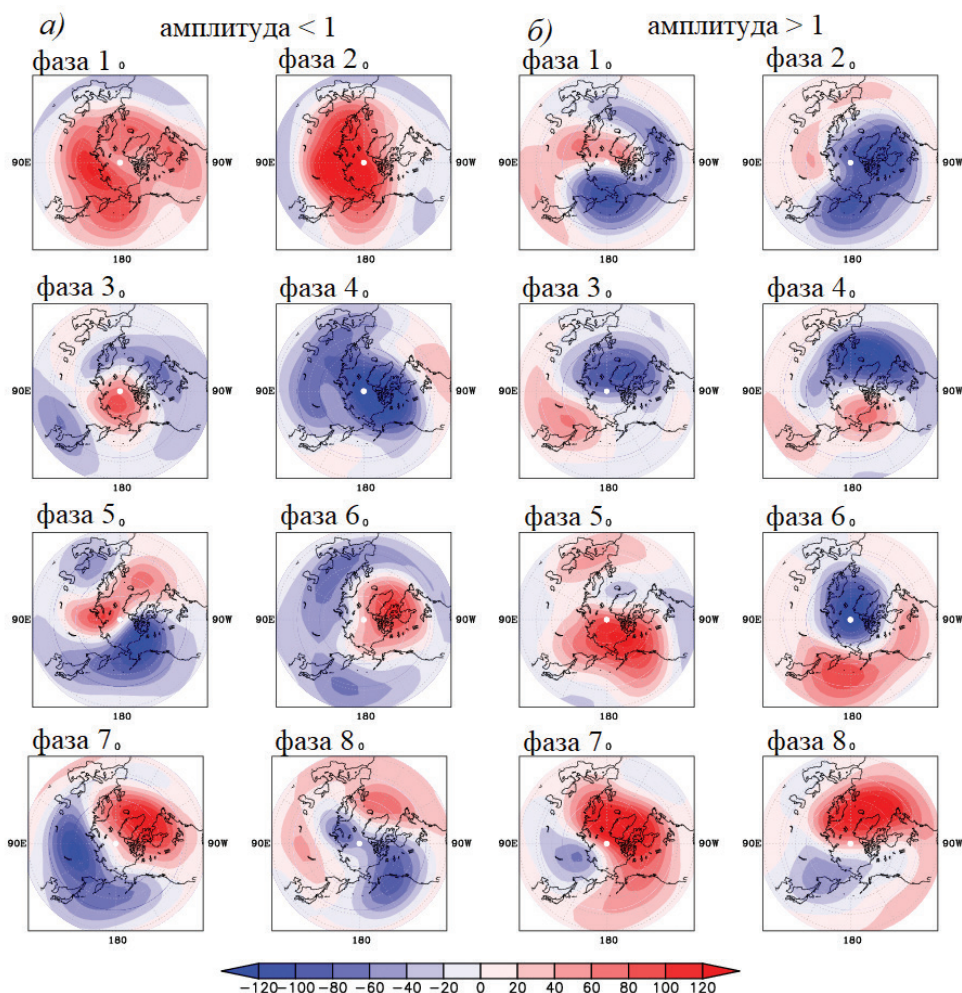


Рис. 4. Распределение аномалий геопотенциальной высоты (м) на изобарической поверхности 1 гПа в зависимости от фазы ОМД.
а — для «слабых событий» ОМД ($A < 1$), б — для «сильных событий» ОМД ($A > 1$).

влияние ОМД распространяется и до верхней стратосферы. Сравнительный анализ результатов, полученных для сильного и слабого воздействия ОМД (рис. 4 а и б соответственно), показывает, что с 1-й по 2-ю фазу во время сильных событий осцилляции в полярной области формируется область со значительными отрицательными отклонениями геопотенциальной высоты с центром над северо-восточной Сибирью и северной частью Канады. При этом в период 1-й и 2-й фазы во время слабых событий осцилляции почти над всей полярной областью велики положительные аномалии. Во время 7-й и 8-й фазы области отклонений геопотенциальной высоты совпадают по местоположению, но различаются по интенсивности. Для слабых событий ОМД характерны более высокие значения отрицательных аномалий и низкие значения положительных аномалий. Для сильных событий, наоборот, над Атлантическим океаном формируются области с высокими значениями положительных аномалий, а над северо-восточной Сибирью и Аляской — слабые отрицательные аномалии.

Анализ полей геопотенциальной высоты в верхней стратосфере во время сильных событий ОМД (см. рис. 4 б) показывает, что интенсивность развития аномалий с отрицательными значениями в некоторой степени совпадает с интенсивностью развития конвективной облачности в тропической области, связанной с осцилляцией Маддена — Джулиана. Полярный вихрь на уровне 1 гПа проходит цикл с 1-й по 8-ю фазу от стадии формирования до стадии заполнения вихря; при этом область отрицательных аномалий движется в восточном направлении. Исключением является только 5-я фаза во время которой наблюдается слабый вихрь, центр которого расположен между Гренландией и Скандинавией. В свою очередь, область с положительными аномалиями геопотенциальной высоты во время цикла ОМД с 1-й по 8-ю фазу развивается и достигает максимума к 7-й и 8-й фазам.

Заключение

Настоящая работа посвящена исследованию связи осцилляции Маддена — Джулиана и полярного вихря. В качестве показателя изменчивости этой осцилляции был использован индекс ОМД, а изменчивость циркуляции полярной стратосферы оценивалась по двум характеристикам полярного вихря — индексу интенсивности и площади полярного вихря (ИВ и ПВ соответственно).

Влияние ОМД на процессы во внетропической стратосфере подтверждает сравнительный анализ параметров полярного вихря (ИВ и ПВ) во время слабого состояния / без воздействия и сильного состояния ОМД. Из представленных результатов можно сделать вывод о том, что влияние тропического колебания ОМД на изменение циркуляции стратосферы зависит от географического положения аномалий, связанных с ОМД. Различные положения облачности в тропической области оказывают разное влияние на интенсивность и площадь полярного вихря.

Анализ индекса ИВ и поля геопотенциальной высоты для верхней стратосферы показал, что во время активного состояния ОМД (примерно в 65 % случаев) интенсивность полярного вихря совпадает со стадиями развития облачности,

наблюдаемыми во время ОМД; к тому же центр полярного вихря смещается в восточном направлении. Можно предположить, что аномалии метеорологических параметров, генерируемые ОМД во время 1—3-й фазы способствуют развитию сильного полярного вихря, а в период с 4-й по 8-ю фазу ведут к ослаблению и заполнению полярного вихря.

Как показал анализ полей геопотенциальной высоты в нижней стратосфере, значения и области аномалий, возникающих за счет ОМД, там меньше, чем в верхней стратосфере. Исходя из этого можно предположить, что ОМД оказывает разное влияние на циркуляционные процессы в верхней и нижней стратосфере. В нижней стратосфере аномалии, генерируемые ОМД, ослабляют средний зональный поток, а в верхней стратосфере способствуют его усилению.

Список литературы

1. Смышляев С.П., Погорельцев А.И., Дробашевская Е.А., Канухина А.Ю. Влияние динамических факторов на озоновые аномалии в Арктике // Ученые записки РГГМУ. 2015. № 41. С. 136—148.
2. Baldwin M.P., Dunkerton T.J. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes // Science. 2001. P. 581—584.
3. Baldwin M.P., Thompson D.W.J. A critical comparison of stratosphere-troposphere coupling indices // Q. J. R. Met. Soc. 2009. V. 135. P. 1661—1672.
4. Garfinkel C.I., Benedict J.J., Maloney E.D. Impact of the MJO on the boreal winter extratropical circulation // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41. P. 6055—6062. DOI:10.1002/2014GL061094.
5. Gill A.E. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation // Q. J. R. Met. Soc. 1980. V. 106. P. 447—462.
6. Madden R.A., Julian P.R. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40–50 day period // J. Atmos. Sci. 1972. V. 29. P. 1109—1123.
7. Matsuno T. A dynamical model of sudden stratospheric warming // J. Atm. Sci. 1971. V. 28. P. 871—883.
8. 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.
9. Weare B.C. Extended Eliassen-Palm fluxes associated with the Madden-Julian oscillation in the stratosphere // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. D24103. DOI:10.1029/2010JD014390.
10. Wheeler M., Hendon H.H. An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction // Mon. Wea. Rev. 2004. V. 132. P. 1917—1932.