

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(РГГМУ)

На правах рукописи
УДК 551.510.529

Кандиева Каныкей Кубанычевна

ВЛИЯНИЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ МАДДЕНА – ДЖУЛИАНА НА ДИНАМИКУ
ВНЕТРОПИЧЕСКОЙ СТРАТОСФЕРЫ

Специальность: 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»

Научный руководитель: Кандидат физико-математических наук,
Анискина Ольга Георгиевна

Научный консультант: Доктор физико-математических наук,
Погорельцев Александр Иванович

Официальные оппоненты: Перцев Николай Николаевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физики верхней атмосферы «Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН», г. Москва.

Кулямин Дмитрий Вячеславович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник «Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН», г. Москва.
Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», г. Калининград.

Защита состоится «__» _____ 2019 г. в __ часов __ минут на заседании диссертационного совета Д.212.197.01 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98, тел. (812) 633-01-82, 372-50-92.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Российского государственного гидрометеорологического университета.

Ваш отзыв на автореферат просим направить по адресу 192007, РФ, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79, Российский государственный гидрометеорологический университет, Диссертационный совет Д.212.197.01, Ученому секретарю.

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.ф.-м.н., доцент

Л. В. КАШЛЕВА

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

За последние десятилетия традиционный взгляд на стратосферу, как на пассивную часть атмосферы изменился. Внимание ученых направлено на изучение стратосферно-тропосферного взаимодействия. Значительное влияние стратосферы на динамику внетропической тропосферы отмечается в периоды, когда состояние стратосферы далеко от климатического: во время внезапных стратосферных потеплений (ВСП) и во время усиления стратосферного полярного вихря. В настоящее время существенное внимание уделяется изучению связи между экваториальными явлениями, такими как стратосферное квазидвухлетнее колебание зонального ветра (КДК), Эль-Ниньо/Южное колебание (ЭНЮК) и динамическими процессами внетропической стратосферы во время бореальной зимы.

Еще одним из возможных источников, влияющих на циркуляцию внетропической стратосферы, являются аномалии конвекции в тропической тропосфере, обусловленные осцилляцией Маддена – Джулиана (ОМД). ОМД это изменение метеорологических характеристик в тропической области, которое проявляется в возникновении кучевой облачности и в перемещении её в восточном направлении вдоль экватора со средней скоростью около 5 м/с, периодом от 30 до 60 суток. Развитие крупномасштабной конвективной ячейки ОМД начинается на западе Индийского океана, затем зона глубокой конвекции перемещается на восток, постепенно затухая по мере продвижения к восточной части Тихого океана. В тропической зоне ОМД оказывает воздействие на изменчивость осадков и температуры воздуха в Тихом океане в районах азиатских Lau и Chan (1986) и австралийских муссонов Hendon и Liebmann (1990), вдоль западного побережья Северной Америки Jones (2000), в Южной Америке Liebmann и др. (2004) , Африке Matthews (2004). ОМД влияет на образование тропических циклонов (ураганов) в Тихом океане и Карибском море Liebmann и др. (1994).

Результаты недавних исследований подтверждают, что влияние ОМД на атмосферные процессы не ограничивается тропической областью. Обнаружена связь между активностью планетарных волн во внетропической стратосфере и ОМД. Было предположено, что аномалии, генерируемые ОМД зимой в северной части Тихого и западной части Индийского океана способны воздействовать на Алеутскую депрессию и контролировать мощность и структуру стратосферного полярного вихря. ОМД оказывает

влияние и на тип образования ВСП: разделению полярного вихря предшествует более сильное событие ОМД. Слабым событиям ОМД соответствует смещение вихря без его разделения. Больше чем половина случаев ВСП возникают, когда аномалии, связанные с ОМД, расположены в Тихом океане.

Несмотря на ранее полученные результаты, существует много нерешенных задач, связанных с влиянием ОМД на состояние стратосферного вихря. Новые данные о физике взаимодействия ОМД и динамических процессов во внетропической стратосфере остаются актуальным научным вопросом. Более того, новые знания о стратосферно-тропосферном обмене позволят повысить качество долгосрочных прогнозов внетропической тропосферы за счет учета процессов в стратосфере. Учёт ОМД позволит повысить качество гидродинамического моделирования атмосферных процессов, поскольку на современном этапе развития физики атмосферы тропосфера уже не рассматривается как изолированный атмосферный слой, единственно ответственный за приземную погоду и климат.

Объект исследования – динамика стратосферы.

Предмет исследования – осцилляции Маденна – Джулиана и ее влияние на динамику зимней внетропической стратосферы Северного полушария.

Целью диссертационной работы является исследование влияния ОМД на особенности циркуляции зимней стратосферы в Северном полушарии: развитие и продолжительность ВСП, формирование и разрушение полярного вихря.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе сформулированы и решены следующие задачи:

- Изучение характеристик ОМД;
- Создание полуэмпирической модели источника ОМД на основе наблюдаемых характеристик ОМД;
- Исследование влияния ОМД на поля метеорологических величин с помощью модели верхней и средней атмосферы (МСВА);
- Оценка влияния ОМД на структуру и интенсивность полярного вихря на основе данных ре-анализа;
- Исследование влияния ОМД на динамические процессы в стратосфере во время весенней перестройки циркуляции.

Соответствие диссертации паспорту специальности: тема диссертационной работы соответствует паспорту специальности 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология: по п.10 (атмосферные процессы в полярных, умеренных и тропических широтах и их моделирование).

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Создана полуэмпирическая модель теплового источника ОМД;
2. Получены оценки совместного влияния ОМД и квазидвухлетнего колебания зонального ветра на динамику внетропической стратосферы;
3. Изучено влияние ОМД на структуру, развитие и разрушение полярного вихря;
4. Рассмотрено влияние ОМД на особенности развития динамических процессов во время событий внезапных стратосферных потеплений.

Научная и практическая значимость результатов.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что впервые продемонстрировано существенное влияние тропической осцилляции ОМД на развитие ВСП во время двух основных фаз КДК, выполнены оценки изменений структуры и площади полярного вихря за счет влияния ОМД, и влияния ОМД на перестройку весенней циркуляции стратосферы.

Практическую ценность представляет предложенная в работе модель ОМД, учет которой в гидродинамических моделях позволит улучшить качество долгосрочных прогнозов и моделирования состояния стратосферы и погодных условий тропосферы.

Методы исследования. В работе использованы методы математического моделирования, аппарат естественных ортогональных функций, спектральный, вейвлет, статистический и корреляционный анализ.

Положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Модельный тепловой источник осцилляции Маддена – Джулиана в тропической области, созданный на основе эмпирически определенных параметров ОМД;
2. Оценки воздействия ОМД на динамические процессы внетропической стратосферы при различных фазах квазидвухлетнего колебания зонального ветра, полученные на основе композитного анализа модельных расчетов и данных ре-анализа;
3. Влияние стадий развития ОМД, определяемых индексом ОМД рассчитанным с использованием аппарата естественных ортогональных функций (ЕОФ), на структуру, интенсивность и эволюцию стратосферного

полярного вихря;

4. Оценки зависимости сроков весенней перестройки циркуляции стратосферы от интенсивности ОМД и активности стационарных планетарных волн, полученные на основе корреляционного анализа.

Обоснованность и достоверность результатов работы подтверждается строгой математической постановкой задачи, корректным использованием методов гидродинамического моделирования, использованием метеорологических данных современных ре-анализов для формирования исходной информации о метеорологических полях, а также непротиворечивостью полученных результатов другим независимым исследованиям по данной тематике. Обоснованность основных результатов подтверждается публикациями в российских изданиях, а также выступлениями с докладами на российских и международных конференциях.

Личный вклад автора. Автор принимала участие в определении цели исследования, формулировала задачи исследования, проводила численные эксперименты, анализировала и интерпретировала полученные данные. Все выносимые на защиту положения основаны на результатах исследований, проведенных автором самостоятельно или при его непосредственном участии.

Апробация работы. По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, в том числе 3 публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, из которых одна публикация индексируется в базах Scopus и Web of Science (журнал "Геомагнетизм и Аэрономия").

Основные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждались на следующих симпозиумах:

генеральная ассамблея the 26th General Assembly of the International Union of Geodesy (Прага, Чехия, 22 июня – 2 июля, 2015);

международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде» и XIV конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» (Иркутск, 14 – 18 сентября, 2015);

международный семинар SPARC DynVar Workshop & S-RIP Meeting “The Large-Scale Atmospheric Circulation: Confronting Model Biases and Uncovering Mechanisms” (Хельсинки, Финляндия, 6 – 10 июня, 2016);

международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» МСАРД-2017 (Санкт-Петербург, Петродворец, 27 – 30 июня, 2017);

6-ая международная конференция «Атмосфера, ионосфера, безопасность» (Калининград, 3 – 9 июня, 2018);

всероссийская научно-практическая конференция «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России» (Иркутск, 21 – 23 марта, 2018);

научные семинары РГГМУ.

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. Объем работы составляет 111 страниц, в том числе 33 рисунка и 4 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 122 наименований.

Основное содержание работы

Во введении приводится обоснование актуальности темы диссертационной работы, описываются рассматриваемые проблемы, ставятся задачи диссертационного исследования, обосновывается научная новизна полученных результатов, их практическая значимость и определяются положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор исследований посвященных изучению характеристик осцилляции Маддена – Джулина, влияния ОМД на динамику внетропической атмосферы и взаимодействия ОМД с атмосферными процессами.

В разделе 1.1 дается обзор исследований структуры ОМД и обсуждаются существующие на настоящий момент теории возникновения осцилляции. Впервые данное колебание были обнаружено в полях давления и зонального ветра в экваториальной тропосфере в 1970 году Роландом А. Мадденом и Полом Р. Джулианом. Это колебание в полях давления и ветра ими было связано с распространением облачности, которая смещается со временем от западной части Индийского океана к восточной части Тихого океана. В современном понимании ОМД – колебание в тропической атмосфере, проявляющее в возникновении кучевой облачности и в перемещении ее в восточном направлении со средней скоростью около 5 м/с, периодом от 30 до 60 дней. Движение скопления облаков сопровождается сцепленными с ним циркуляционными ячейками. Обычно структуру ветра объясняют с точки зрения теории экваториальных волн, взаимодействующих с конвекцией. На востоке от конвективной ячейки наблюдается экваториальная волна Кельвина, на западе волна Россби. Крупномасштабное

скопление облачности ОМД состоит из множества высокочастотных, мезомасштабных конвективных зон распространяющихся в восточном и западном направлениях. Наблюдаемое перемещение облачности ОМД в восточном направлении происходит в результате более интенсивного развития новой высокочастотной конвективной зоны к востоку от предыдущей.

Существует две теории, объясняющие зарождение облачности ОМД над западной частью Индийского океана. Согласно первой, ОМД есть атмосферный отклик на внешнее воздействие. Распространение облачности на восток и связь между конвекцией и ветром являются побочным результатом этого воздействия. Согласно второй – ОМД генерируется самопроизвольно через неустойчивость атмосферы, причем взаимодействие между конвекцией и зональной циркуляцией является ключевым процессом неустойчивости. Причинами зарождения кучевой облачности ОМД могут быть, как тропические, так и внетропические процессы.

Раздел 1.2 посвящен обзору работ об исследовании взаимосвязи ОМД с атмосферными процессами, а также механизмов распространения возмущений, генерируемых ОМД, во внетропическую область. Рассматриваемые исследования проводились как на основе обработки данных наблюдений, так и методами математического моделирования. Было обнаружено, что ОМД воздействует на многие атмосферные процессы, тем самым влияя на погоду и климат по всему земному шару. Доля дисперсии циркуляции в верхней тропосфере (200 гПа), которая объясняется влиянием ОМД, составляет 70% в тропической области обоих полушарий. Во внетропической области Северного полушария значение дисперсии меняется от 35 до 40%, а в Южном полушарии она равна всего 20%.

ОМД оказывает воздействие на изменчивость осадков и температуры воздуха почти по всей тропической зоне. ОМД взаимодействует с явлением большего (годового) масштаба Эль-Ниньо/Южная осцилляция (характерное время осцилляции 3–8 лет), оказывая влияние на зарождение ЭНЮК. ОМД может быть одним из источников западных аномалий ветра, способным поддерживать распространение этих аномалий на восток и тем самым воздействовать на океаническую волну Кельвина. ОМД не оказывает существенного воздействия на океан в период Ла-Нинья, но способствует генерации Эль-Ниньо. Стоит отметить, что характеристики ОМД могут изменяться под влиянием ЭНЮК. Область аномалий западного ветра, наблюдаемая на западе от зоны конвекции ОМД, простирается дальше на восток в период фазы развития Эль-Ниньо.

Обнаружена связь между КДК и ОМД и показано, что во время восточной фазы КДК интенсивность событий ОМД выше, чем при западной фазе КДК. Предполагают, что КДК может модулировать волновые возмущения, генерируемые ОМД, влияя на субтропическое течение в верхней тропосфере.

Выявлена корреляционная связь между интенсивностью стратосферного полярного вихря и стадиями развития ОМД. Полагают, что при прохождении области глубокой конвекции, связанной с ОМД, над западной частью экваториального Тихого океана усиливаются вихревые потоки тепла из зоны конвекции в тропосферу и стратосферу над северной частью Тихого океана. В тропосфере это приводит к понижению приземного давления, а в стратосфере – к разрушению полярного вихря.

Механизм распространения возмущений генерируемых ОМД основан на выделении скрытого тепла конденсации в процессе развития облачности. Неадиабатический нагрев, связанный с ОМД, способен порождать аномалии атмосферной циркуляции по всему земному шару. Ответная реакция на источник нагрева в тропической области формируется в виде экваториальных волн Россби на западе и волн Кельвина на востоке от источника нагрева. Во внетропической области ответная реакция на источник нагрева формируется в виде системы волн Россби, в состав которой входят крупномасштабные волны с зональными волновыми числами 2 – 3 в северном и 3 – 5 в южном полушарии. Образуются они от источника нагрева атмосферы, связанного с ОМД, когда ОМД находится над Индийским океаном.

Выявлено существование двух возможных чередующихся типов меридиональных откликов на осцилляцию Маддена – Джулиана в стратосфере полярных широт. В первом типе, возмущения, связанные с ОМД, распространяются от экватора к полюсу в тропосфере, а в области высоких широт распространяются в стратосферу. В другом типе, вертикальные потоки направлены из тропической/субтропической тропосферы в стратосферу и уже в стратосфере перемещаются по направлению к полюсу.

В разделе 1.3 приводится описание источников данных и методика проведения расчетов. В диссертационном исследовании использованы данные ре-анализа MERRA – проект Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (США, НАСА) и ре-анализ Японского метеорологического агентства – JRA-55. Представлен метод вычисления индекса ОМД (ИОМД) основанный на применении

аппарата естественных ортогональных функций (ЕОФ). По двум первым главным компонентам разложения можно судить об амплитуде и фазе ОМД (интенсивности и положению облачности ОМД, соответственно). Цикл ОМД разделен на 8 фаз. Время перехода между каждой фазой составляет 6 дней, но может меняться от события к событию. Излагается общая формулировка используемой в работе гидродинамической модели средней и верхней атмосферы (МСВА), которая использована для проведения численных экспериментов влияния ОМД на метеорологические характеристики внетропической стратосферы.

Создание модели ОМД на основе анализа особенностей колебаний в полях метеорологических величин и полученных сигналов ОМД в поле нагрева атмосферы описаны во **второй главе**.

Модель ОМД может быть представлена тепловым источником, так как в процессе образования облачности выделяется скрытое тепло конденсации. Для построения модели источника были рассчитаны поля нагрева атмосферы и исследованы параметры сигнала ОМД в поле нагрева. Скрытое тепло конденсации в облаках вертикального развития было рассчитано по количеству конвективных осадков с помощью полуэмпирического выражения Hong S.S. и Wang P.H. (1980):

$$J(\lambda, \varphi, z) = J_z(z)J(\lambda, \varphi)$$

где $J(\lambda, \varphi)$ – распределение интенсивности осадков;

$J_z(z)$ – функция распределения скрытого тепла по вертикали в зависимости от интенсивности осадков у поверхности земли:

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

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

Процедура определения сигнала ОМД в поле нагрева атмосферы состояла из следующих этапов:

1) разложение полей нагрева на зональные гармоники с помощью метода наименьших квадратов;

2) выделение во временных рядах волн, распространяющихся на восток и на запад;

3) восстановление временных рядов с использованием амплитуд и фаз комплексного вейвлет – преобразования Морле, учитывая периоды в интервале 15 – 90 суток для распространяющихся на восток и запад компонент.

Было установлено, что сигнал ОМД в поле нагрева атмосферы может быть представлен суммой гармоник с волновыми числами $m = 1 - 9$ восточной составляющей волны (рисунок 1а), так как согласуется с данными ИОМД. Анализ всех полученных данных показал, что сигнал ОМД обладает следующими параметрами: средняя фазовая скорость 5 м/с, амплитуда нагрева 1,5 К/сут, период 45 дней, протяженность 180 градусов долготы.

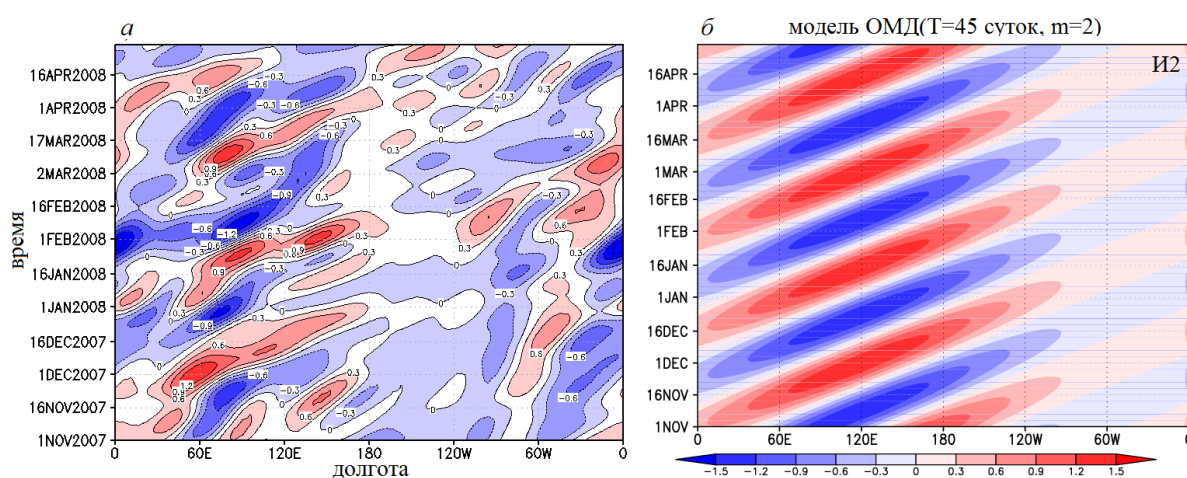


Рисунок 1 – Долготно-временные разрезы. а – восстановленные временные гармоники волн бегущих на восток для m от 1 до 9 на широте экватора, на высоте 7 км для периода с ноября по апрель 2007–2008 гг; б – диаграмма распределения скрытого тепла вдоль экватора на высоте 7 км для модели источника тепла с $T = 45$ дней и $m = 2$

На основе полученных параметров ОМД модельный источник ОМД представлен в виде перемещающегося на восток в тропической зоне источника нагрева атмосферы. Было проанализировано два варианта источника нагрева атмосферы (или два вида возмущения). Фазовой скорости равной 5 м/с соответствует источник нагрева в виде волны с зональным волновым числом $m = 3$ и периодом колебания $T = 30$ суток. Второму варианту источника для скорости равной 5 м/с соответствует волна с зональным волновым числом $m = 2$ и $T = 45$ суток. Области нагрева имеют 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).

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

$$Q(\lambda, \varphi, z, t) = A[1 + \cos(m\lambda - \omega t)] \exp\left(-\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}\right)^2 - \left(\frac{\varphi}{\varphi_0}\right)^2 - \left(\frac{(z - z_0)}{\Delta z}\right)^2\right)$$

где $Q(\lambda, \varphi, z, t)$ – нагрев атмосферы, который зависит от долготы, широты, высоты и времени;

A – амплитуда нагрева 1,5 К/сут;

m – зональное волновое число;

ω – угловая скорость вращения Земли $\omega = 2\pi/T$;

λ_0 – долгота, на которую приходится максимальный нагрев $\lambda_0 = 120^\circ$ в.д.;

φ_0 – широта, ограничивающая аномалии нагрева $\varphi_0 = 15^\circ$;

z_0 – высота максимального значения нагрева $z_0 = 7$ км;

Δz – вертикальный шаг МСВА.

Сравнительный анализ сигнала ОМД в поле нагрева атмосферы и модельных источников позволил сделать вывод о том, что количественные характеристики модельного источника ОМД с периодом $T = 45$ суток и волновым числом $m = 2$ (рисунок 1б) согласуются по большинству параметрам с сигналом ОМД, а также модельные распределения аномалий нагрева вдоль экватора имеют одинаковую структуру с фактическими данными. В дальнейшем подобный источник нагрева ОМД использован для оценки эффекта воздействия ОМД на метеорологические величины с помощью модели МСВА.

В третьей главе описываются результаты исследований влияния ОМД на процессы в стратосфере.

На первом этапе была оценена чувствительность модели МСВА к включению источника ОМД. В результате численных экспериментов сделан вывод о том, что без включения разработанной параметризации осцилляция МД моделью не воспроизводится. Включение источника ОМД позволило более корректно описать не только процессы в тропической тропосфере, но и

оценить влияние ОМД на внетропическую стратосферу.

С использованием модели МСВА исследовалось влияние КДК и ОМД на процессы во внетропической стратосфере. Проводились численные эксперименты с моделью МСВА при включении параметризации ОМД для условий западной и восточной фазы КДК, оценено влияние каждого из факторов (КДК и ОМД) отдельно для периода январь – февраль.

Численные эксперименты проводились с учётом и без учёта ОМД в модели при разных фазах КДК, которая задавалась включением дополнительного слагаемого в прогностическое уравнение для зональной компоненты скорости. Слагаемое, учитывающее фазу КДК, пропорционально разности рассчитанных и климатических распределений средних значений зональной скорости ветра для западной и восточной фазы КДК.

Для исключения воздействия ЭНЮК на динамику стратосферы, в качестве нижних граничных условий использованы распределения метеорологических величин наблюдаемые во время нейтральной фазы ЭНЮК.

Изменения аномалий циркуляции, вызванные ОМД, по данным наблюдений вычислены как разность полей при сильном и слабом событии ОМД в тропической области. Интенсивность события ОМД определялась по амплитуде ИОМД. Считалось, что численные эксперименты с включением и без включения ОМД в модель МСВА соответствуют периодам «сильной» и «слабой» интенсивности события ОМД, соответственно.

На рисунке 2 приведены разности средних значений зональной компоненты скорости ветра и температуры воздуха при западной и восточной фазах КДК без включения (*a* и *б*) и с включением модели ОМД (*в* и *г*). Распределения средних зональных характеристик усреднены за январь – февраль месяцы. На рисунке 2 *д*, *е* приведены для сравнения разности значений средней зональной скорости и температуры воздуха при западной и восточной фазах КДК по данным архива MERRA.

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о том, что в отсутствие дополнительного источника тепла, связанного с ОМД, (с января по февраль) влияние фазы КДК на циркуляцию полярной стратосферы и температурный режим оказывается весьма сильным (рисунок 2 *a*, *б*). Включение ОМД полностью меняет характер распределений – разности средней зональной скорости во внетропических широтах изменили знак, стали меньше по величине и сместились к югу на 10 – 15°, ослабили аномалии температуры в полярной области (рисунок 2 *в*, *г*). Согласие с данными

MERRA, приведенными на рисунке 2 *д, е*, при этом возросло. Заливкой показаны распределения статистической значимости в соответствии с *t*-критерием Стьюдента в модификации Уэлча, которые указывают, что полученные результаты статистически значимы с достоверностью более 96 %.

Можно предположить, что ОМД способствует усилению стратосферного струйного течения во время западной фазы КДК и ослаблению струйного течения во время восточной фазы, что подтверждается высокими значениями статистической значимости полученных результатов.

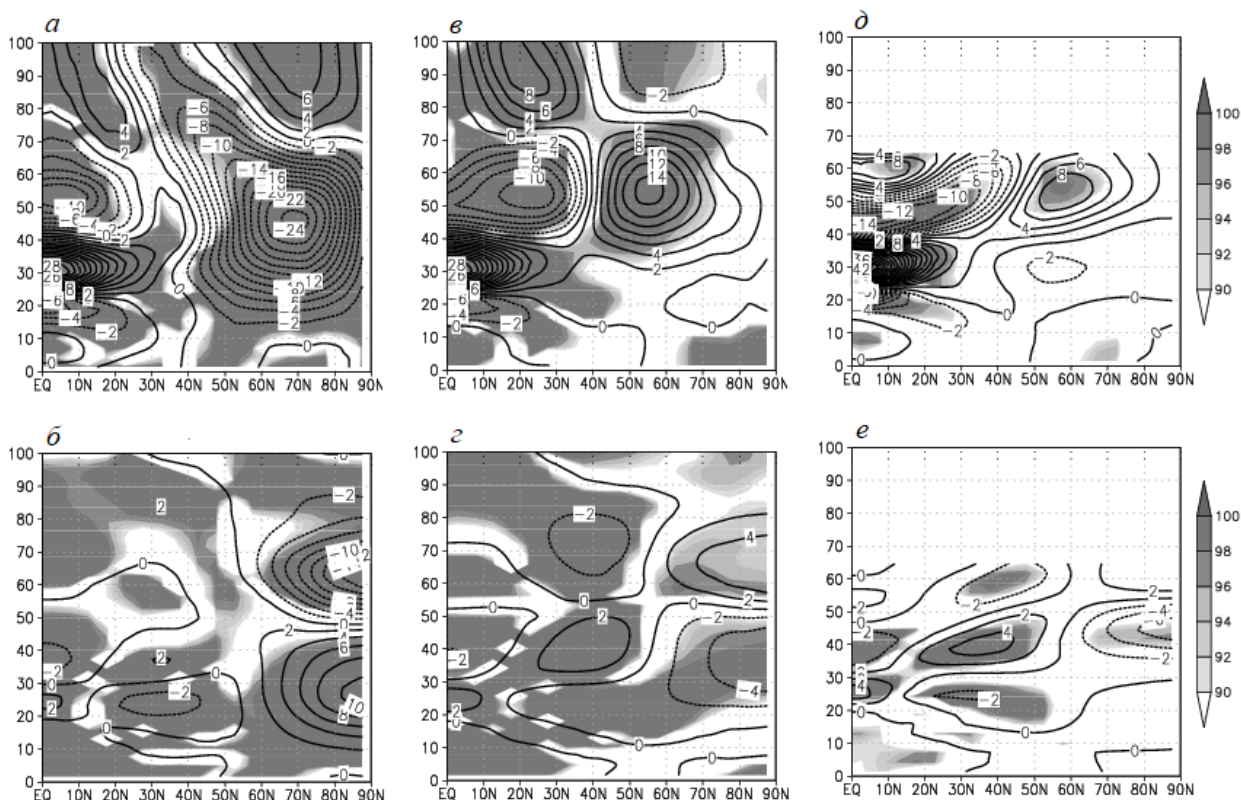


Рисунок 2 – Разности средней зональной скорости ветра (*а, в, д*) и средней зональной температуры воздуха (*б, з, е*) при западной и восточной фазах КДК: *а, б* – без включения ОМД в модель; *в, з* – с включением ОМД в модель; *д, е* – по данным реанализа MERRA. Заливка – распределения статистической значимости (показаны уровни значимости в процентах) полученных значений разности в соответствии с *t*-критерием Стьюдента

Далее оценен реальный климатический эффект влияния ОМД на циркуляцию внетропической стратосферы без разделения на западную и восточную фазу КДК.

Для этого была проанализирована разность суммарных распределений средних зональных скоростей и средней зональной температуры при западной и восточной фазах КДК (20 реализаций), полученные в

экспериментах с включением ОМД, и распределений суммы средних зональных скоростей и средних зональных температур при западной и восточной фазах КДК в экспериментах без ОМД. Вклад ОМД в динамические процессы стратосферы по данным наблюдений рассчитывался как разность между метеорологическими полями в период сильной и слабой интенсивности ОМД вне зависимости от фазы КДК.

Анализ результатов численных экспериментов выявил их соответствие данным архива ре-анализа JRA-55 (рисунок 3) и позволяет сделать вывод о том, что вклад ОМД в изменение средней зональной скорости и средней зональной температуры наблюдается с высот средней стратосферы (20км). Также очень чётко прослеживается влияние ОМД на полярный вихрь: во время сильных событий ОМД полярный вихрь становится более устойчивым, аномалии температуры в полярной области стратосферы уменьшаются на ~ 5 К.

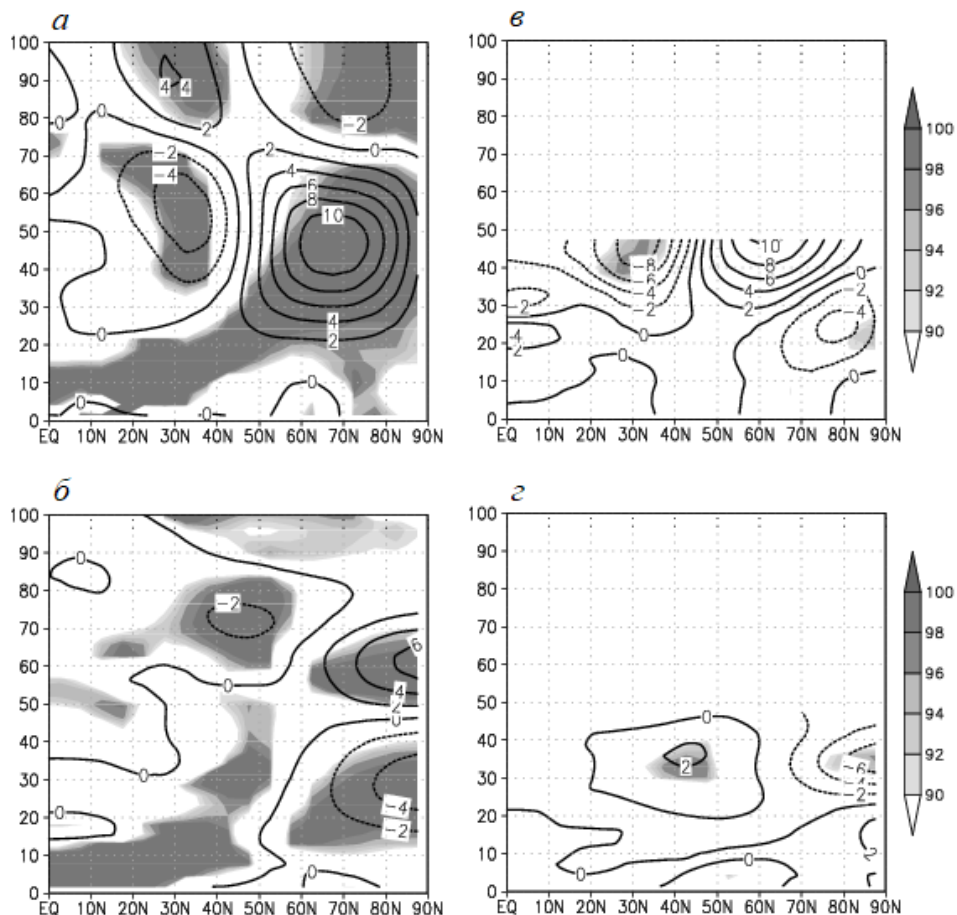


Рисунок 3 – Изменение зональной скорости ветра (*а, в*) и температуры воздуха (*б, г*) вызванные ОМД: *а, б* – изменения метеорологических величин полученные по модельным данным; *в, г* – изменения метеорологических величин полученные по данным JRA-55.

Заливка – распределения статистической значимости (показаны уровни значимости в процентах) полученных значений разности в соответствии с t -критерием Стьюдента

Оценен вклад ОМД в изменение средней зональной скорости и температуры отдельно для восточной и западной фазы КДК. На рисунке 4 представлены графики изменения со временем средней зональной температуры на высоте 30 км в широтном диапазоне от 60 – 90° N в экспериментах с разными фазами КДК, с учетом и без учета ОМД.

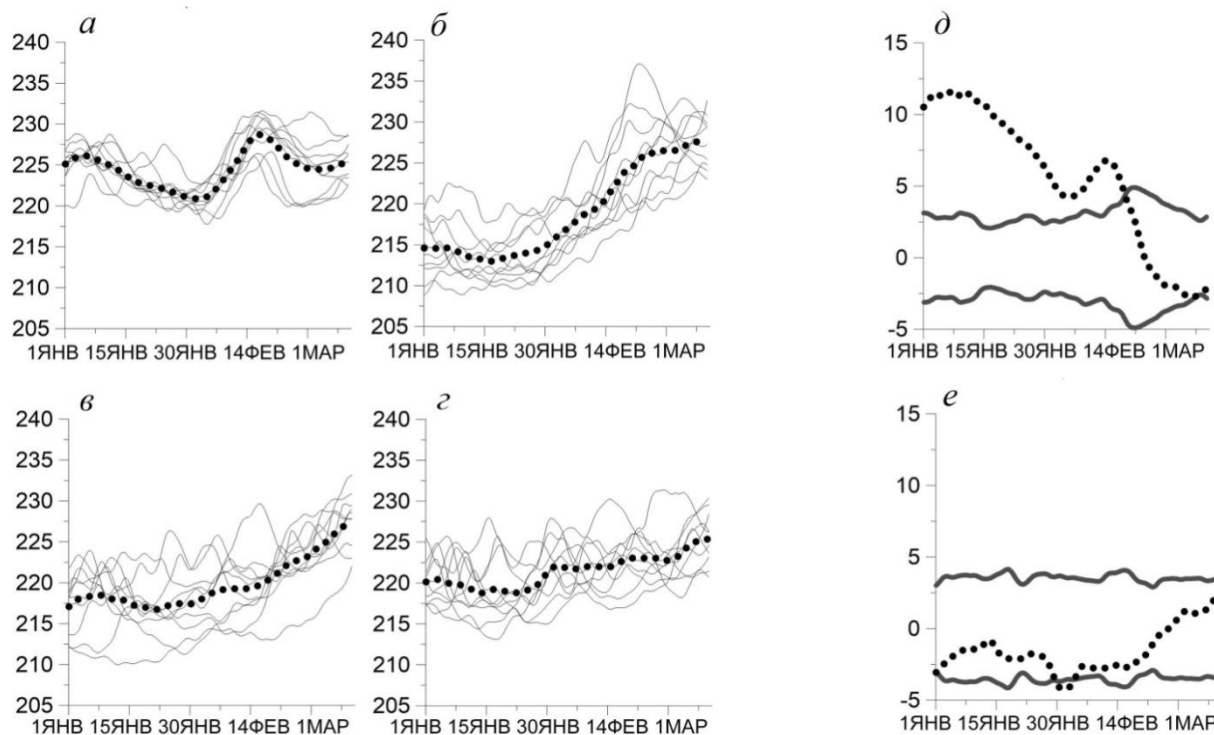


Рисунок 4 – Вариации температуры воздуха в полярной стратосфере при западной ($a, б$) и восточной ($в, з$) фазах КДК без включения ОМД ($a, в$) и с включением ОМД ($б, з$) на высоте 30 км. Точками показано среднее изменение температуры по 10 реализациям модели. Графики разностей средних по ансамблям значений температуры, вызванных включением ОМД для западной ($д$) и восточной ($е$) фазы КДК. Сплошные линии на правых рисунках ограничивают область значений разностей, соответствующих уровню значимости 95% по t -критерию Стьюдента

При западной фазе КДК повышение температуры, обусловленные ВСП, происходят, в основном, в первой половине января и во второй половине февраля (рисунок 4а). Детальный анализ результатов совместного влияния ОМД и КДК показал, что во время западной фазы КДК и сильном ОМД стратосферное струйное течение становится более устойчивым и развитие ВСП сдвигается на более поздний срок (рисунок 4б). Установлено, что

аномалии температуры выше и ниже струйного течения ослабевают, а при ВСП, как правило, наблюдается более высокая температура.

При восточной фазе КДК потепления менее регулярны и чаще всего возникают в конце холодного периода (март) (рисунок 4в), ОМД мало влияет на температурный режим полярной области стратосферы (рисунок 4г). Детальный анализ результатов влияния ОМД во время восточной фазы КДК показал, что стратосферное струйное течение неустойчивое и ослабевает каждый раз при любых, даже не самых высоких, изменениях амплитуды СПВ1. Потепления могут происходить зимой в произвольные моменты времени как в стратосфере, так и в мезосфере. ОМД влияет на период существования и частоту развития ВСП: увеличивается период и количество ВСП в холодный период года.

Механизм влияния ОМД на циркуляцию полярной стратосферы пока объяснить не удалось. По результатам экспериментов можно предположить, что ОМД, представляющая собой локализованный по долготе волновой пакет, распространяющийся в восточном направлении, может передавать импульс среднему зональному потоку в стратосфере, увеличивая скорость потока и снижая вероятность развития ВСП.

В четвертой главе описаны результаты исследования влияния ОМД на развитие полярного вихря. Влияние ОМД на интенсивность и структуру полярного вихря рассмотрено в разделе 4.1, связь ОМД с датой весенней перестройки циркуляции стратосферы Северного полушария представлена в разделе 4.2.

Анализ изменчивости стратосферы проводился с помощью двух суточных параметров – индекса интенсивности вихря (ИВ) и площади полярного вихря (ПВ). Значения, которых были вычислены для холодного сезона (ноябрь – апрель) периода с 1985 – 2015 гг. с шагом 24 часа на десяти изобарических поверхностях в стратосфере и усреднены для 8 фаз ОМД (рисунок 5, 6).

Ежедневные значения площади ПВ определялись, как площадь ячеек сетки, в которых завихренность отрицательна.

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.

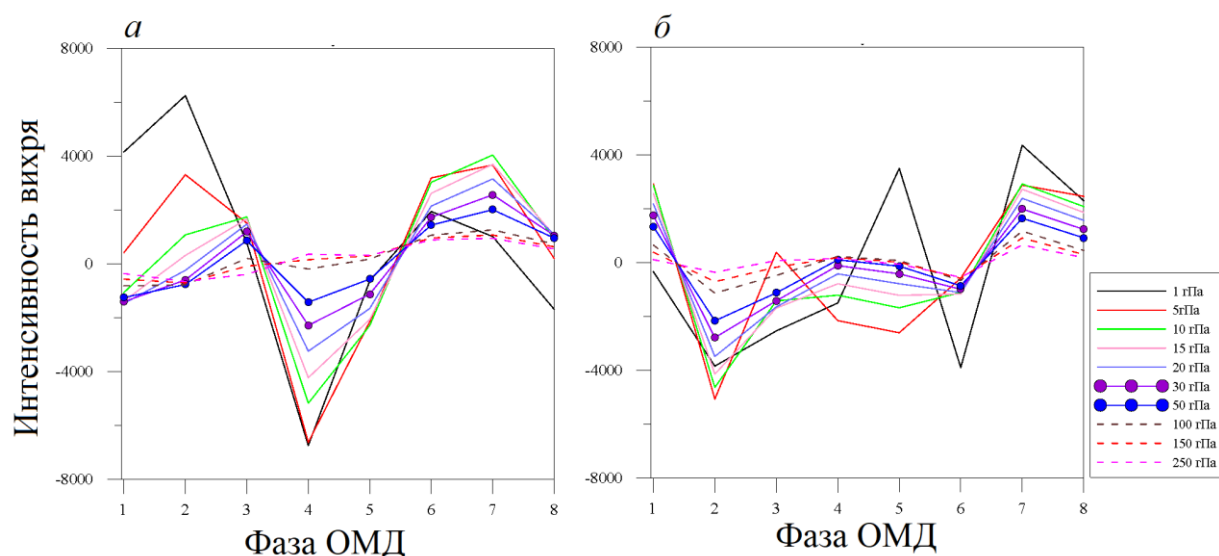


Рисунок 5 – Кривые зависимости среднего значения индекса ИВ от фазы ОМД: *a* – для «слабых» ОМД; *б* – для «сильных» ОМД

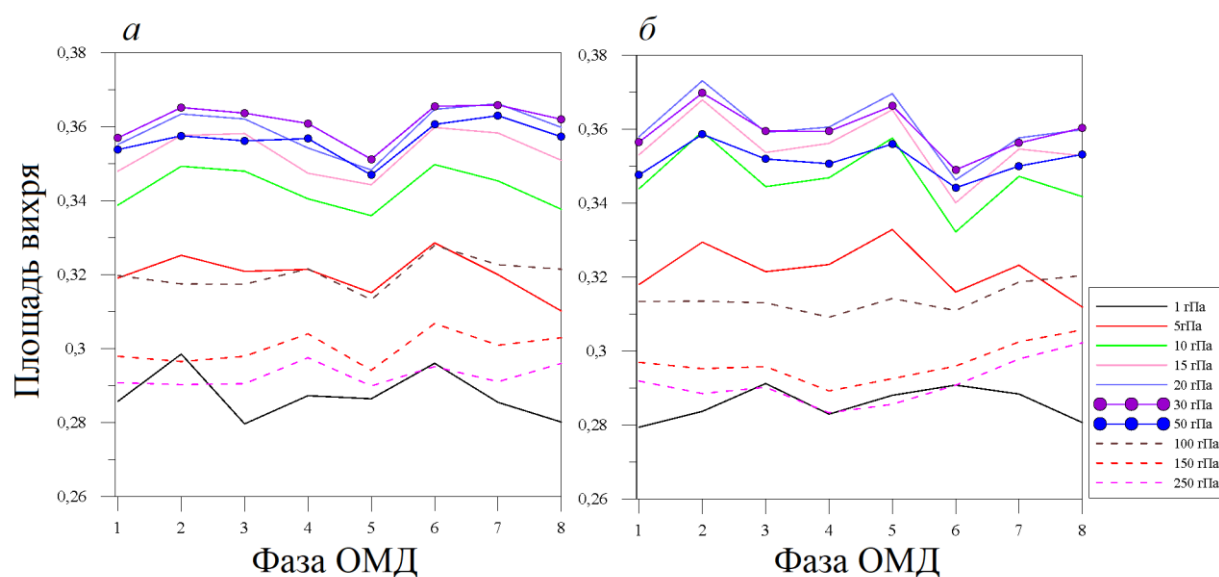


Рисунок 6 – Кривые зависимости среднего значения площади полярного вихря, нормированной на квадрат среднего радиуса Земли, от фазы ОМД: *a* – для «слабых» ОМД; *б* – для «сильных» ОМД

Полученные результаты позволили 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. Во время сильных событий ОМД оказывает различное воздействие на полярный вихрь в верхней (5 и 1 гПа) и средней стратосфере. Индекс ИВ отрицателен в большее количество фаз ОМД по сравнению со значениями индекса ИВ во время слабых ОМД. Анализ изменения площади вихря позволяет сделать вывод о том, что в вертикальном развитии площадь вихря достигает максимума на уровне 30 гПа, минимальное значение площади вихря приходится на 5-ю фазу во время слабого состояния ОМД. Во время сильных событий ОМД максимальная площадь вихря наблюдается на 20 гПа.

Анализ аномалий геопотенциальной высоты поверхностей в верхней стратосферы (1 гПа) для 8 фаз ОМД показал, что во время сильных событий ОМД (примерно в 65 % случаев) колебание интенсивности полярного вихря совпадает со стадиями развития облачности, наблюдаемыми во время ОМД; а 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.

Для оценки связи ОМД и смены режима циркуляции стратосферы с зимнего на летний были определены моменты весенней перестройки (ВП) циркуляции на трех высотах стратосферы (24, 30 и 42 км) в период 1958 – 2016 гг. Анализ дат перестроек показал, что весенняя перестройка циркуляции стратосферы наступает раньше в верхней стратосфере (42 км). День весенней перестройки во всей атмосфере варьируется в диапазоне ~ 2 месяцев от года к году на всех высотах.

Анализ связи даты весенней перестройки и амплитуды стационарных планетарных волн с волновыми числами 1 и 2 (СПВ1 и СПВ2) наблюдаемых перед весенней перестройкой выявил статистически значимую линейную связь между двумя переменными с достоверностью более 98 %. Значения коэффициентов корреляции представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициент корреляции Пирсона (r)

Высота (км)	ВП/СПВ1	ВП/СПВ2
24	-0,7	-0,61
30	-0,82	-0,68
42	-0,84	-0,76

Была оценена линейная связь ОМД и даты весенней перестройки. Получен статистически значимый (с достоверностью 95%) линейный коэффициент корреляции амплитуды ОМД и даты ранней весенней перестройки – $r = - 0,39$. Корреляционный анализ амплитуды ОМД (полученной за 10 дней до интервала расчета активности волн) и амплитуды СПВ1 и СПВ2 наблюдаемых перед датой весенней перестройки показал также статистически значимую линейную связь.

Вычисление корреляционной связи проводилось для слабых и сильных СПВ и ОМД отдельно. Слабые и сильные СПВ определялись относительно среднего значения за весь рассматриваемый период. Было установлено существование связи между слабыми СПВ1 и СПВ2 на высоте 30 км. Коэффициент корреляции Пирсона для ОМД и СПВ1 составил 0,43, для ОМД и СПВ2 – 0,38, связь статистически значима с вероятностью 96%.

На основе полученных результатов можно предположить, что, возможно, ОМД передает импульс среднему зональному потоку, который препятствует распространению планетарных волн, тем самым смещая дату весенней перестройки на более поздний срок. С другой стороны, ОМД инициирует конвективные переносы тепла в тропосфере и стратосфере. В зависимости от фазы ОМД эти переносы могут либо усиливать, либо ослаблять климатический гребень и антициклон над северной частью Тихого океана, играющие важную роль в развитии ВСП.

В заключение сформулированы основные результаты, полученные в ходе диссертационного исследования.

1. Предложен метод идентификации сигнала ОМД в поле нагрева атмосферы. Идея определения сигнала ОМД заключалась в подборе количества гармоник распространяющейся на восток составляющей волны, образующих сигнал ОМД. Сигнал ОМД состоящий из гармоник от $m = 1$ до 9 был выбран подходящим, так как больше соответствует данным наблюдений. Данный метод определения сигнала ОМД хорошо захватывает осцилляцию: средний период сигнала ОМД составляет 45 дней; средняя фазовая скорость около 5 м/с; амплитуда нагрева 1,5 К/сут; протяженность сигнала 180°.

2. Создана аналитическая модель теплового источника ОМД на основе полученных параметров ОМД и профилей скрытого тепла. Показано, что распространение областей нагрева модели ОМД, в виде волнового возмущения с зональным волновым числом 2 и периодом 45 суток, лучше согласуются со стадиями развития ОМД по данным наблюдений. Такой вид источника соответствует характеристикам сигнала ОМД в поле нагрева

атмосферы.

3. Проведены численные эксперименты влияния ОМД и КДК на динамику внетропической стратосферы с помощью модели МСВА. Установлено, что ОМД вносит вклад в устойчивость полярного вихря, при этом температура в полярной области стратосферы понижается на ~ 5 К. В условиях западной фазы КДК при включении ОМД в модель стратосферное струйное течение становится более устойчивым и развитие ВСП сдвигается на более поздний срок. Анализ результатов совместного влияния ОМД и восточной фазы КДК показал, что потепления могут происходить зимой в произвольные моменты времени.

4. В результате исследования влияния ОМД на стратосферный полярный вихрь получено, что изменение циркуляции полярной стратосферы зависит от географического положения аномалий, связанных с ОМД. Аномалии метеорологических параметров, генерируемые ОМД, во время 1–3-й фазы способствуют развитию сильного полярного вихря, а с 4-й по 8-ю фазу ведут к ослаблению и заполнению полярного вихря. ОМД оказывает различное влияние на циркуляционные процессы верхней и нижней стратосферы. Возможно в нижней стратосфере аномалии, генерируемые ОМД, ослабляют средний зональный поток, а в верхней стратосфере способствуют его усилению.

5. Установлено, что ОМД может сдвигать дату весенней перестройки на более поздний срок. Механизм влияния ОМД на циркуляцию полярной стратосферы до конца неясен. ОМД, представляющая собой локализованный по долготе волновой пакет, распространяющийся в восточном направлении, может передавать импульс среднему зональному потоку в стратосфере, увеличивая скорость потока и снижая вероятность развития перестройки и ВСП. С другой стороны, ОМД инициирует конвективные переносы тепла в тропосфере и стратосфере. В зависимости от фазы ОМД эти переносы могут либо усиливать, либо ослаблять климатический гребень и антициклон над северной частью Тихого океана, играющие важную роль в развитии весенней перестройки и ВСП.

Публикации соискателя по теме диссертации.

В изданиях из перечня ВАК:

Опубликованные:

1. Кандиева К.К., А.И. Погорельцев, О.Г. Анискина. Модельный источник генерации осцилляции Маддена–Джулиана // Ученые записки РГГМУ. – 2017. – № 47. – С. 91–105.

2. Кандиева К.К., А.И. Погорельцев, О.Г. Анискина. Влияние осцилляции Маддена–Джулиана на интенсивность и структуру полярного вихря // Ученые записки РГГМУ. – 2018. – № 50. – С. 18–27.

3. Кандиева К.К., А.И. Погорельцев, О.Г. Анискина, О.С. Зоркальцева, В.И. Мордвинов. Влияние осцилляции Маддена–Джулиана и квазидвухлетнего колебания на динамику внетропической стратосферы // Геомагнетизм и аэрономия. – 2019. – том 59, № 1. – С. 114-124. DOI: 10.1134/S0016794018060068

Другие публикации за период написания диссертации:

1. Кандиева К.К., Анискина О.Г. Влияние динамических процессов в тропиках на стратосферу» // XIV конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» – Иркутск, 2015. – С. 93.

2. Кандиева К.К., Анискина О.Г., Погорельцев А.И. «Модельное исследование осцилляции Маддена – Джулиана» // международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» – Санкт-Петербург, Петродворец, 2017. – С. 216.

3. Kandieva K.K., Aniskina O.G., Pogoreltsev A.I. " Influence of the Madden - Julian oscillation on extratropical atmosphere circulation" // 6th International conference " Atmosphere, Ionosphere, Safety" – Kaliningrad, 2018. – P. 185 – 189.

4. Зоркальцев О.С., В.И. Мордвинов, К.К. Кандиева, А.И. Погорельцев. «Динамика возмущений в страто-мезосфере при разных фазах квазидвухлетнего колебания» // Всероссийская научно-практическая конференция «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России» – Иркутск, 2018. – С. 148-156.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями просим направить по адресу **192007, РФ, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79, Российский государственный гидрометеорологический университет, Диссертационный совет Д.212.197.01, Ученому секретарю.**

В отзыве необходимо указать полностью ФИО, ученую степень, ученое звание, должность и место работы, полное наименование учреждения, почтовый адрес, телефон и электронную почту.