

УДК 551.583

На правах рукописи

Канухина Анна Юрьевна

**КЛИМАТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ АКТИВНОСТИ ПЛАНЕТАРНЫХ
ВОЛН В ТРОПОСФЕРЕ И СТРАТОСФЕРЕ**

Специальность 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

г. Санкт-Петербург
2008 г.

Диссертация выполнена на кафедре метеорологических прогнозов
Российского государственного гидрометеорологического университета.

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук
Погорельцев Александр Иванович

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук
Гаврилов Николай Михайлович

Кандидат физико-математических наук
Кулешов Юрий Владимирович

Ведущая организация: Научно-производственное объединение “Тайфун”
Институт экспериментальной метеорологии (ИЭМ)

Защита диссертации состоится “27” ноября 2008 г. в 15 часов 30 минут на заседании
диссертационного совета Д.212.197.01 в Российском государственном гидрометеоро-
логическом университете по адресу:

195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98, тел. (812)444-41-63.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гид-
рометеорологического университета по адресу:

195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.

Автореферат разослан “25” октября 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
профессор, доктор физ. - мат наук

А. Д. Кузнецов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Изучение климатической изменчивости динамических процессов в стратосфере представляет собой значимую и актуальную задачу, т.к. является составным элементом разработки теории общей циркуляции атмосферы. Прикладная значимость исследований определяется влиянием стратосферных процессов на радиационно активные газовые составляющие, температуру воздуха, а также погоду у поверхности Земли. Динамические процессы в средней атмосфере (высоты от 15 до 110 км) вызывают особый интерес с середины 1970-х гг. Одним из основных объектов исследования являются волны глобального масштаба. Диапазон факторов такого интереса велик: от изучения причин и следствий изменения климата Земли до прикладных задач улучшения прогноза погоды в приземном слое. Например, в течение последнего десятилетия ведется довольно успешная разработка методов улучшения долгосрочных и среднесрочных прогнозов погоды в тропосфере при использовании данных о циркуляции в средней и верхней атмосфере и стратосферно-тропосферных связях [1, 2, 3].

Важным свойством планетарных волн (ПВ) является перенос энергии и импульса при их распространении из нижней атмосферы в вышележащие слои. В результате диссипации в стратосфере и выше в мезосфере и термосфере, волны передают переносимые энергию и импульс среде, тем самым, воздействуя на тепловой баланс и среднезональную циркуляцию атмосферы. Таким образом, одним из основных механизмов, отвечающих за энергетическое и динамическое взаимодействие различных слоев атмосферы, является процесс распространения и диссипации волн планетарного масштаба. Значимость влияния стратосферы на процессы у поверхности Земли определяют следующие факторы:

1. изменение содержания стратосферного озона влияет на количество ультрафиолетовой радиации, приходящей к земной поверхности, и количество озона в тропосфере;
2. радиационный баланс тропосферы подвержен воздействию изменений в стратосфере посредством изменения содержания водяного пара, озона и других газов, ответственных за парниковый эффект, т.е. наблюдается прямое влияние на температуру поверхности;
3. погода и климат, зависящие от стратосферной динамики; такие связи выявлены в работах Baldwin and Dunkerton (2001) и Baldwin et al. (2003); изменение содержания аэрозолей в стратосфере вызывает изменения в радиационном балансе тропосферы из-за вариаций содержания парниковых газов, например, диоксида углерода.

Понимание влияния изменчивости солнечной радиации на погоду в тропосфере возможно при тщательном рассмотрении вертикальных связей «солнечное излучение – мезосфера – стратосфера – тропосфера» [4].

Работа выполнялась в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 05-05-64485), направленного на решение фундаментальной проблемы динамики атмосферы, связанной с изучением

межгодовой изменчивости и климатических трендов температуры, зонального потока и активности планетарных волн в тропо-стратосфере, а также посвященного исследованию возможных эффектов в средней атмосфере, обусловленных этими изменениями. Указанная проблема приобретает особую актуальность в последнее время в связи с необходимостью выяснения относительного вклада динамических и фотохимических процессов в формирование наблюдаемых климатических изменений температуры атмосферы на различных высотах.

Основные цели диссертационной работы

Для достижения поставленной цели необходимо было решить задачи, которые включают в себя:

1. исследование климатической, межгодовой и внутрисезонной (стратосферные вадцилляции) изменчивости планетарных волн в стратосфере на основе анализа глобальных распределений метеорологических полей;
2. моделирование распространения стационарных ПВ с помощью линеаризованной модели и МСВА (модели средней и верхней атмосферы);
3. сопоставление наблюдаемых климатических изменений с результатами оценок; вывод о значимости возможных вариаций метеорологических параметров и общей циркуляции, обусловленных динамическими процессами в тропосфере.

Научная новизна и предполагаемая реализация

Имеющиеся результаты были неоднократно представлены для обсуждения и приняты среди отечественных и зарубежных ученых в данной области исследований. Полученные теоретические выводы представляют заметный вклад в решении фундаментальной проблемы атмосферной динамики и изменения климата. Планируется использование достигнутых результатов в дальнейших исследованиях средней и верхней атмосферы, проводимых в рамках Договора о сотрудничестве кафедры метеорологических прогнозов РГГМУ и ЛИМ (Лейпцигский институт метеорологии), и в работах по РФФИ проектам.

Предмет исследования включает в себя:

1. Бегущие и стационарные планетарные волны с волновыми числами 1 и 2 (СПВ1 и СПВ2).
2. Нерегулярные колебания амплитуды СПВ и интенсивности среднего потока в стратосфере (вадцилляции).
3. Изменение динамического режима стратосферы за последние 50 лет.
4. Стратосферно-тропосферные связи.

Поставленные задачи

1. Оценить долгопериодную изменчивость амплитуд СПВ1 и СПВ2 по данным NCEP/NCAR ре-анализа.

2. Произвести модельную оценку чувствительности условий распространения и амплитуды СПВ1 в стратосфере к изменениям распределения скорости среднезонального потока в тропосфере.
3. Рассмотреть изменения амплитуд вассилляций СПВ1 и бегущих 5-,10-,16-дневных волн за последние 50 лет.
4. Проанализировать долгопериодный ход вассилляций СПВ1 в совокупности с изменением индекса QBO, солнечной активностью.
5. Обобщить результаты исследования взаимосвязи климатической изменчивости активности СПВ и динамики атмосферы.

Метод исследования

В настоящий момент среднезональная структура атмосферы достаточно хорошо изучена по данным стандартных радиозондовых наблюдений вплоть до уровня 10 гПа (~ 30 км). Выше этого уровня основным источником сведений служит ракетное зондирование и дистанционное температурное зондирование со спутников, которое дает более полную информацию о верхних слоях атмосферы [5].

Существуют различные источники информации о глобальном распределении метеорологических полей, применимые к задачам исследований климатической изменчивости планетарных волн. Различаются они по однородности рядов наблюдений, вертикальной протяженности рядов и, что немаловажно, доступности данных. В представленной работе для анализа трендов температуры, зонального потока и планетарных волн были выбраны данные NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research) ре-анализа [6]. Они включили в себя восстановленные значения параметров состояния поверхности земли, измерения с кораблей, данные радио-ветрового зондирования и шаров-пилотов, самолетные измерения и результаты спутниковых наблюдений, начиная с 1948 года. В течение временного интервала с 1948 по 1957 год было получено меньше результатов наблюдений (особенно в Южном Полушарии). Поэтому ре-анализ для этих данных менее надежен, чем за последние 40 лет. Ассимиляционная система NCEP/NCAR ре-анализа продолжает использоваться с текущими данными в реальном времени, т.е. результаты доступны с 1948 года по настоящее время.

Характерной особенностью средней атмосферы (особенно в зимний период) является существенная незональность метеорологических полей, поэтому в основу исследований общей циркуляции атмосферы положено разделение циркуляционной картины на осредненное по долготе (среднезональное) движение и отклонения от этого среднего, или вихри. Глобальные возмущения среднезонального потока представлялись в виде суммы зональных гармоник (ряд Фурье) с малыми зональными волновыми числами или планетарными волнами (ПВ). Для выделения волн, бегущих на запад или на восток, использовался вейвлет-анализ.

Для расчета распространения СПВ1 сначала была использована модель глобальной структуры планетарных волн, линеаризованная относительно среднезонального состояния [7,8]. Исходная линеаризованная система пяти уравнений гидротермодинамики, записанная для одной гармоники с зональным

волновым числом m , была сведена к системе двух дифференциальных уравнений в частных производных, которая соответствует системе, используемой в теории приливов при нахождении собственных функций приливного оператора Лапласа [9]. На нижней границе задавалось климатическое распределение амплитуды и фазы возмущения геопотенциальной высоты для СПВ1, т.е. нижнее граничное условие оставалось неизменным, и все изменения в стратосфере и выше в мезосфере и нижней термосфере были обусловлены изменением условий распространения волны за счет изменения зонального потока в тропосфере. В термосфере, где молекулярная теплопроводность является доминирующим процессом, возмущения температуры выходят на постоянные (не зависящие от высоты) значения [10]. Метод решения сформулированной граничной задачи на сфере описан в работе [11] и основан на численном обращении широтного оператора планетарных волн с учетом взаимодействия возмущений на различных уровнях.

Остальные модельные расчеты были произведены с помощью трехмерной нелинейной модели общей циркуляции атмосферы МСВА (Модель Средней и Верхней Атмосферы), разработанной на основе модели COMMA-LIM (Cologne Model of the Middle Atmosphere-Leipzig Institute for Meteorology) [12, 13, 14]. МСВА была модифицирована для возможности учета в ней полученных в результате анализа данных NCEP/NCAR широтно-высотных распределений среднезональной температуры в тропосфере. Такой учет позволил реалистично воспроизводить в численных экспериментах расположение и интенсивность струйных течений в тропосфере, что важно для правильного моделирования распространения СПВ в стратосферу. На уровне 1000 гПа задавались осредненные за 1992-2002 гг. распределения геопотенциальной высоты и температуры для января, учитывающие среднезональные значения, а также СПВ с зональными волновыми числами $m=1-3$, которые были получены из данных NCEP/NCAR реанализа. Кроме этого, в прогностическое уравнение для температуры было введено дополнительное слагаемое, пропорциональное разности рассчитанной и наблюдаемой (соответствующей условиям, характерным для 1960 и 2000 гг. [глава 1 диссертации]) среднезональной температуры в тропосфере. Константа пропорциональности представляет собой величину, обратно пропорциональную характерному времени релаксации рассчитанной температуры к наблюдаемой. Время релаксации полагалось равным 5 суткам. Следует отметить, что первые 30 модельных дней расчеты проводились с нулевыми значениями геопотенциальной высоты на нижней границе и только после этого постепенно вводились наблюдаемые распределения. В качестве начального распределения полей гидродинамических величин использовалась безветренная гидростатически сбалансированная атмосфера с вертикальным профилем температуры, характерным для января. Первые 120 модельных дней расчеты проводились с учетом только среднесуточного нагрева атмосферы и без дополнительного прогностического уравнения для геопотенциала на нижней границе. Последнее неявно означает, что все волны, которые генерируются распределенными в атмосфере источниками (например, за счет суточных вариации солнечного нагрева и/или в

результате нелинейных взаимодействий первичных волн), рассчитываются с нулевыми значениями возмущения геопотенциальной высоты на нижней границе. После 120-го модельного дня постепенно включаются суточные вариации солнечного нагрева, и используется дополнительное прогностическое уравнение для геопотенциала на нижней границе (вернее, для отклонения геопотенциала от заданного климатического распределения, рассчитанного по данным NCEP/NCAR). Поскольку стратосферные вадцилляции являются квазихаотическим процессом [15], для их изучения выполнялся ряд модельных экспериментов с несколько различными начальными условиями, а затем исследовались статистические свойства полученного ансамбля решений. Для того, чтобы ввести в модель изменчивость начальных условий, включались вариации суточного нагрева атмосферы, и учитывалось дополнительное прогностическое уравнение для геопотенциала на нижней границе в различные моменты времени. Для получения ансамбля решений производилось «включение» на 120, 121 и т.д. модельный день. Расчеты до 330-го модельного дня проводились для условий 1-го января (фиксированное положение Солнца), затем, чтобы рассмотреть сезонную перестройку циркуляции, начиная с 330 и по 390 модельный день, учитывалось изменение зенитного угла. В результате, интервалы расчетного времени с 330 по 361 и с 361 по 389 модельный день соответствуют январю и февралю. Для получения ансамблей решений были выполнены модельные расчеты с использованием распределений среднезональной температуры в тропосфере, характерных для января 1960 и 2000 гг. (по 10 вариантов расчетов в каждом ансамбле). Более детальное описание МСВА и схема численных экспериментов представлены в третьей главе диссертации и в работах [15, 16].

Личный вклад автора

Основные результаты работы являются оригинальными и получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии.

Автор принимал непосредственное участие в расчетах и оценке долгопериодной изменчивости амплитуд СПВ1, СПВ2, вадцилляций СПВ1 и бегущих волн по данным NCEP/NCAR ре-анализа и результатам моделирования с помощью МСВА, проанализировал долгопериодный ход вадцилляций СПВ1 в совокупности с изменением индекса QBO, солнечной активностью, участвовал в формулировке итогов проведенных исследований взаимосвязи климатической изменчивости активности СПВ и изменения динамики атмосферы.

Публикация и апробация работы

По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ. Содержание работы докладывалось на заседаниях студенческого научного общества РГГМУ, научно-технических семинарах кафедр РГГМУ и Института метеорологии университета г. Лейпцига, международных конференциях, а именно: на IAGA/ICMA/CAWSES семинаре по долгопериодным трендам в атмосфере (2006, г. Соданкюля, Финляндия), семинаре BRIDGE “Keep it Cool” по проблемам различных аспектов изменения климата (2007, Санкт-Петербург, Россия; Шеффилд, Великобритания), ежегодной встрече IUGG (2007, г. Перуджа, Италия),

международной летней школе “High Northern Latitude Climate” (2007, Петергоф), семинарах ДААД (2007, Бонн, Германия; 2008, Москва), на 5-м совещании IAGA/ICMA/CAWSES «Long Term Changes and Trends in the Upper Atmosphere», проходившем в ААНИИ (сентябрь 2008, Санкт-Петербург).

Структура и объем работы

Работа состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка литературы из 59 наименований, включает 25 рисунков. Общий объем диссертации – 103 страницы.

Автор выражает глубокую признательность за помощь и поддержку руководителю доктору физ.-мат. наук Погорельцеву А. И. (РГГМУ) и профессору Кристофу Якоби (Институт метеорологии Университета г. Лейпцига).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении и в первой главе обоснована актуальность темы, дан обзор соответствующей литературы и анализ использования данных NCEP/NCAR реанализа. Отмечен вклад ряда отечественных и зарубежных ученых в развитие системы знаний о динамике средней атмосферы. Обоснована эффективность исследуемых климатических изменений планетарных волн. Сформулирована цель и приведены основные результаты первого этапа работы. На основе анализа научных литературных данных и цели работы сформулированы описанные ниже основные задачи исследования, которые включают:

1. анализ СПВ с различными волновыми числами по данным NCEP/NCAR ре-анализа с 1959;
2. анализ межгодовой, сезонной и долгопериодной изменчивости СПВ;
3. численное моделирование распространения СПВ с использованием линеаризованной модели и сравнение фактических данных по стратосфере с модельными расчетами;
4. анализ изменчивости средней и верхней атмосферы посредством моделирования СПВ и сравнение с опубликованными в литературе научными данными;

Подробно изложены результаты первого этапа исследований климатических изменений среднезональных полей характеристик состояния средней атмосферы. Они включают в себя следующее:

1. на высотах ~10 км наблюдаются значительные изменения температуры, скорость имеет различный знак в высоких и низких широтах;
2. изменение положения и интенсивности тропосферной струи в зимнем полушарии соответствует увеличению широтного градиента температуры, максимум смещается к высоким широтам;
3. результаты моделирования с использованием фонового среднезонального ветра за 1960 и 2000 показали рост амплитуды СПВ1 в стратосфере и мезосфере зимнего полушария за последние декады.

В первой главе приведена информация о выполненном детальном анализе трендов температуры и зонального потока по данным NCEP/NCAR ре-анализа. Исходными данными для этой работы являлись распределения температуры,

геопотенциала и зонального потока в тропо- и стратосфере для января с 1948 по 2007 год (полный период NCEP/NCAR ре-анализа). Для анализа использовались данные на 8 изобарических поверхностях: 1000, 500, 400, 300, 200, 100, 30, 10 гПа, которые предоставлялись с 6-часовым временным интервалом. Для исследования возможных климатических изменений среднезональных характеристик и СПВ был выбран январь, поскольку известно, что наибольшая активность СПВ в стратосфере наблюдается в зимний период [17, 18], а данные ре-анализа для Северного Полушария являются более надежными [6, 19]. Полученные широтно-высотные распределения среднезональной температуры и среднеквадратичные отклонения показали, что значительная межгодовая изменчивость температуры наблюдается только в стратосфере высоких широт зимнего полушария. Что, по-видимому, является проявлением эффектов внезапных стратосферных потеплений. Также было выявлено отсутствие значительной межгодовой изменчивости среднезональной температуры в низких широтах внутри 11-летнего временного интервала, из чего следует слабое проявление эффектов 11-летнего солнечного цикла в значениях температуры тропо- и стратосферы.

Для оценивания долгопериодных (климатических) трендов температуры была рассчитана скорость линейного изменения температуры в тропо-стратосфере методом наименьших квадратов. Расчеты проводились с использованием осредненных за последовательные 11-летние временные интервалы распределений температуры, т.е. T(1970-1980) - T(1959-1969) и т.д. Анализ полученной скорости изменения температуры показал, что нижняя стратосфера средних широт и над экватором в среднем охлаждается. Однако, высокоширотная стратосфера в обоих полушариях существенно нагревается. Следует также отметить, что в зимнем полушарии на высотах порядка 10 км скорость изменения температуры имеет различный знак в низких (нагрев) и высоких (охлаждение) широтах. В результате сопоставления полученных данных с климатическим распределением температуры, мы увидели, что в среднем происходит рост абсолютной величины широтного градиента температуры на средних широтах в тропосфере, что должно приводить к усилению тропосферного струйного течения в зимнем полушарии. С целью проверки этого предположения, был выполнен аналогичный анализ изменения зональной скорости ветра в 1959-2002 гг. Максимальная межгодовая изменчивость зонального потока наблюдается в стратосфере низких и средних широт зимнего полушария, что может быть объяснено проявлением квази-двухлетних колебаний (низкие широты) и внезапных стратосферных потеплений (средние широты зимнего полушария). Межгодовая изменчивость зонального потока в тропосфере существенно меньше, чем в стратосфере. В средних широтах на высотах тропосферы среднезональный поток в среднем ускоряется. Следует также отметить, что в зимнем полушарии на высотах порядка 10-15 км в низких широтах зональный поток тормозится. Сопоставление полученного результата с климатическим распределением тропосферных струйных течений, показало, что происходит смещение максимума тропосферной струи зимнего полушария к высоким широтам, что должно сказаться на условиях распространения СПВ из тропосферы в стратосферу.

Во второй главе представлена оценка долгопериодной изменчивости СПВ 1 и 2, васциляций и описаны полученные результаты (Рисунок 1):

1. наблюдается положительный тренд амплитуды геопотенциальной высоты для СПВ1 на уровне 30 гПа на 62.5° с.ш.;
2. сильная изменчивость амплитуд СПВ1 отмечена преимущественно в течение последних лет 1960-х и 1980-х гг. Намного более интенсивная изменчивость наблюдается за 1980-1990 гг.;
3. межгодовая изменчивость СПВ2 является более сложной, и это можно объяснить за счет интерференции первичных волн, распространяющихся снизу, и вторичных СПВ2, возникающих из-за нелинейного взаимодействия с СПВ 1. Изменения амплитуд СПВ2 имеют различный знак на низких широтах летнего (южного) полушария и в зимнем (северном) полушарии.

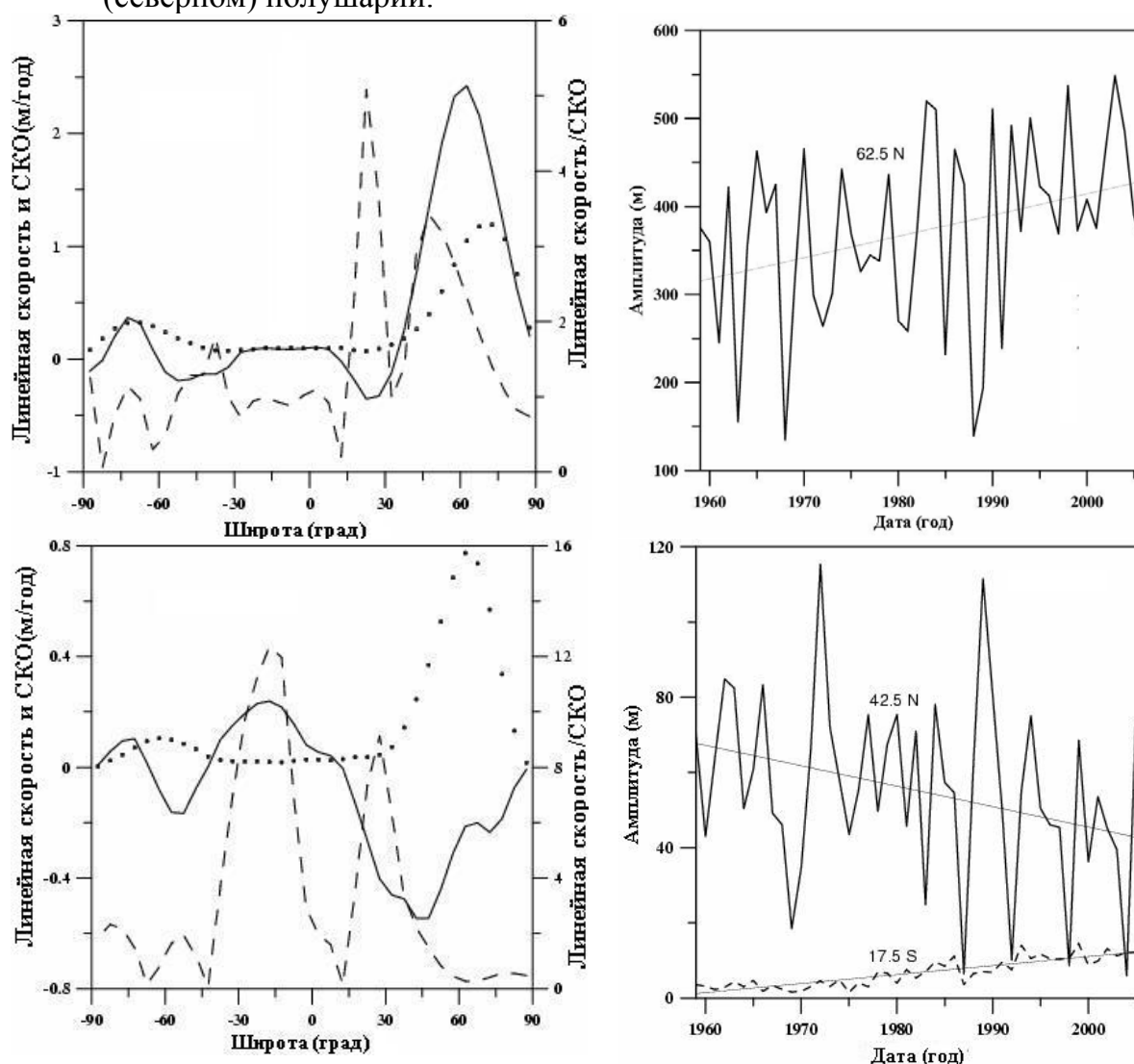


Рисунок 1 – Широтное распределение линейной скорости (сплошная), стандартного отклонения (пунктир) и отношения линейных скоростей к этим отклонениям (штрих) геопотенциальной высоты для амплитуды СПВ1(верхние рисунки) и СПВ 2(нижние рисунки), на уровне 30 гПа(слева). Долговременная изменчивость амплитуды СПВ1 и 2, геопотенциальная высота, м, 30 гПа, NCEP (справа).

С использованием распределений фонового зонального потока для 1960 и 2000 годов были проведены модельные расчеты распространения СПВ с $m = 1$. Активность СПВ1 в стратосфере должна усиливаться. С целью проверки этих результатов были рассчитаны среднемесячные амплитуды и фазы возмущений геопотенциальной высоты и фонового зонального потока для зональной гармонике с $m = 1$ для января за все годы NCEP/NCAR ре-анализа, т.е. с 1959 по 2007 гг. Происходило увеличение амплитуд и их квадратичных отклонений в стратосфере зимнего полушария в течение последних лет. Также СПВ1 сместилась в сторону высоких широт, и появился дополнительный максимум в амплитуде среднеквадратического отклонения в средних широтах. Возможно, появление этого максимума вызвано увеличением числа спутниковых наблюдений в низких широтах в стратосфере, которые были ассимилированы в модели NCEP/NCAR.

Оценка линейной скорости изменения СПВ1 в нижней стратосфере проводилась посредством анализа СПВ1 и СПВ2 с использованием геопотенциальной высоты по данным NCEP/NCAR. Амплитуды СПВ1 и СПВ2 осреднялись за три зимних месяца. Статистически значимые изменения амплитуд СПВ1 существуют в средних широтах северного полушария зимой. В случае СПВ2 существуют статистически значимые изменения амплитуд в средних широтах северного полушария и в низких широтах (южное полушарие). В высоких широтах зимой статистическое значение ниже для обоих случаев (СПВ1 и СПВ2) преимущественно благодаря сильной межгодовой изменчивости. В общем, линейная скорость изменения амплитуды СПВ2 меньше по сравнению с СПВ1. На рис. 2 показаны широтно-высотные распределения амплитуд (слева) и фаз (справа) возмущений геопотенциальной высоты для СПВ1, полученные осреднением за январь-февраль и по 10 вариантам расчетов для условий 1960 (вверху) и 2000 (внизу) годов.

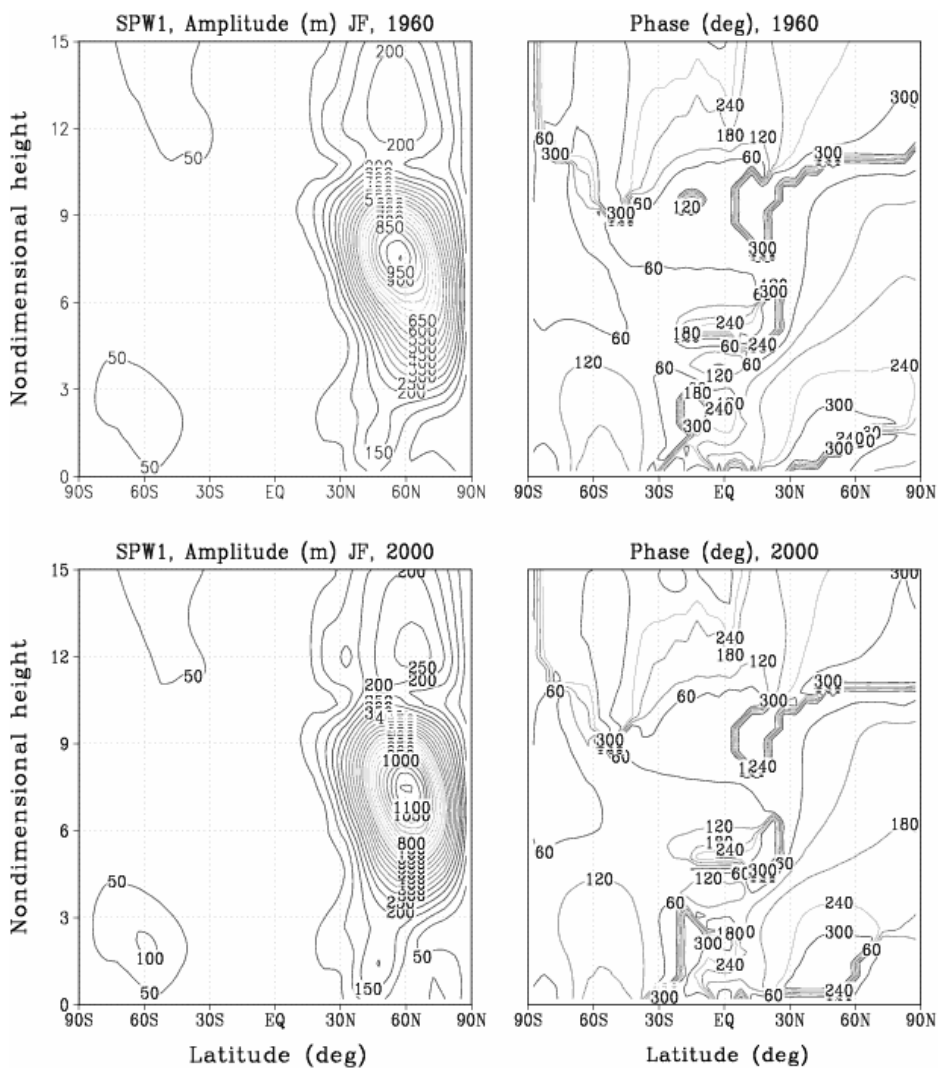


Рисунок 2 – Широтно-высотные распределения амплитуд (слева) и фаз (справа) возмущений геопотенциальной высоты для СПВ1, полученные осреднением за январь-февраль и по 10 вариантам расчетов для условий 1960 (вверху) и 2000 (внизу) гг.

Из рисунка видно, что имеется существенное увеличение амплитуды СПВ1 за последние десятилетия. Можно отметить также некоторое изменение распределения фазы СПВ1 в тропосфере и нижней стратосфере зимнего полушария, которое отражает изменение условий распространения волны. Рост амплитуды СПВ1 должен сопровождаться также усилением нелинейного взаимодействия этой волны со средним потоком и, как следствие, увеличением амплитуды стратосферных васцилляций, т.е. внутрисезонной изменчивости амплитуды волны. Оценка внутрисезонной и межгодовой изменчивости может быть сделана по среднеквадратичным изменениям амплитуды СПВ1 при осреднении за январь-февраль (внутрисезонная изменчивость) и по среднеквадратичным изменениям амплитуды волны при последующем осреднении по 10 вариантам расчетов (межгодовая изменчивость).

Рисунок 3 отражает временной ход стандартных отклонений амплитуд СПВ1, полученных при осреднении за 3 зимних месяца на уровне 30 гПа. Нелинейное взаимодействие между ПВ и средним потоком наблюдается

преимущественно на верхних уровнях, поэтому ожидаемая внутрисезонная изменчивость амплитуд СПВ1 и их климатический тренд должны быть сильнее в средней и верхней стратосфере. Тогда как данные NCEP/NCAR позволяют проследить характеристики ПВ только до высоты 30-35 км. Для того чтобы сделать анализ изменчивости динамики ПВ в верхней стратосфере производились расчеты с помощью модели МСВА, чему и посвящена Глава 4. Но перед этим, в главе 3, уделено внимание характеристикам васцилляций и бегущих волн за последние 50 лет по данным NCEP/NCAR.

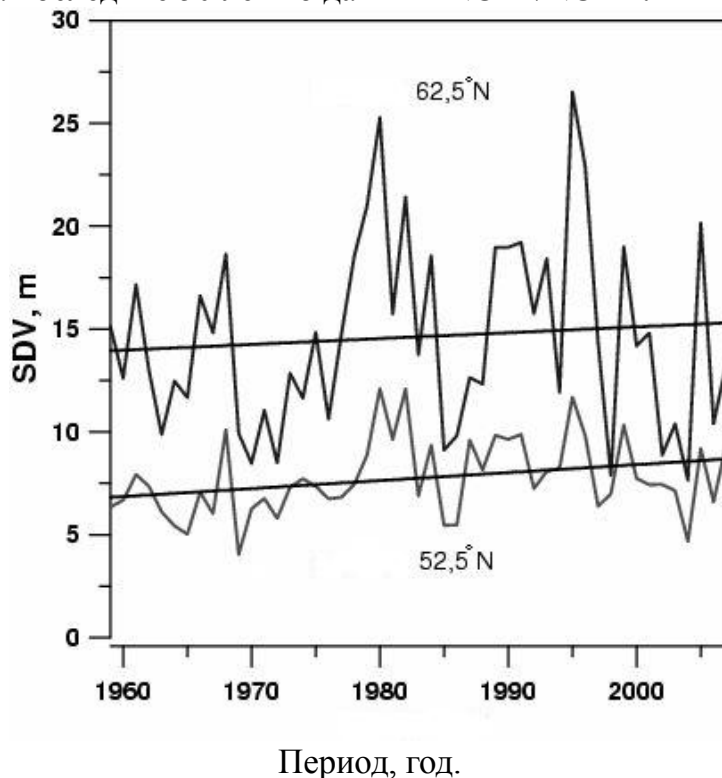


Рисунок 3 – Внутрисезонная изменчивость амплитуды СПВ1 по данным NCEP/NCAR на уровне 30 гПа.

В третьей главе рассматривается климатическая изменчивость бегущих волн и взаимодействия ПВ со среднезональным потоком. Приведено описание процедуры разделения волн на васцилляции и на бегущие на запад или восток волны. Анализ выполнялся построением спектров амплитуд возмущений геопотенциальной высоты, осредненных за 1959-2006 годы. Несмотря на то, что амплитуды волн, бегущих на восток, в отдельные годы по величине больше, чем бегущие на запад, их период менее продолжителен. Поэтому при осреднении амплитуда для волн, распространяющихся на запад, всегда больше. Далее рассматривались спектры для васцилляций СПВ и бегущих на запад волн. В стратосфере постоянно присутствуют распространяющиеся на запад ПВ, которые могут быть идентифицированы с собственными глобальными колебаниями атмосферы (5 и 10, 16-дневные волны). Сопоставляя появление во времени возрастания амплитуд долгопериодных колебаний СПВ, распространяющихся на восток и запад ПВ, можно предположить, что долгопериодная изменчивость активности ПВ обусловлена колебаниями

амплитуды и смещением фазы СПВ на восток или запад (в среднем волна остается неподвижной). Линейный тренд изменения амплитуды геопотенциальной высоты 5-дневной волны с $m=1$ за весь исследуемый временной интервал на уровне 30 гПа и на 62° с.ш. указывает на незначительный рост амплитуды 5-дневной волны (Рисунок 4), причем изменчивость амплитуды очень сильная.

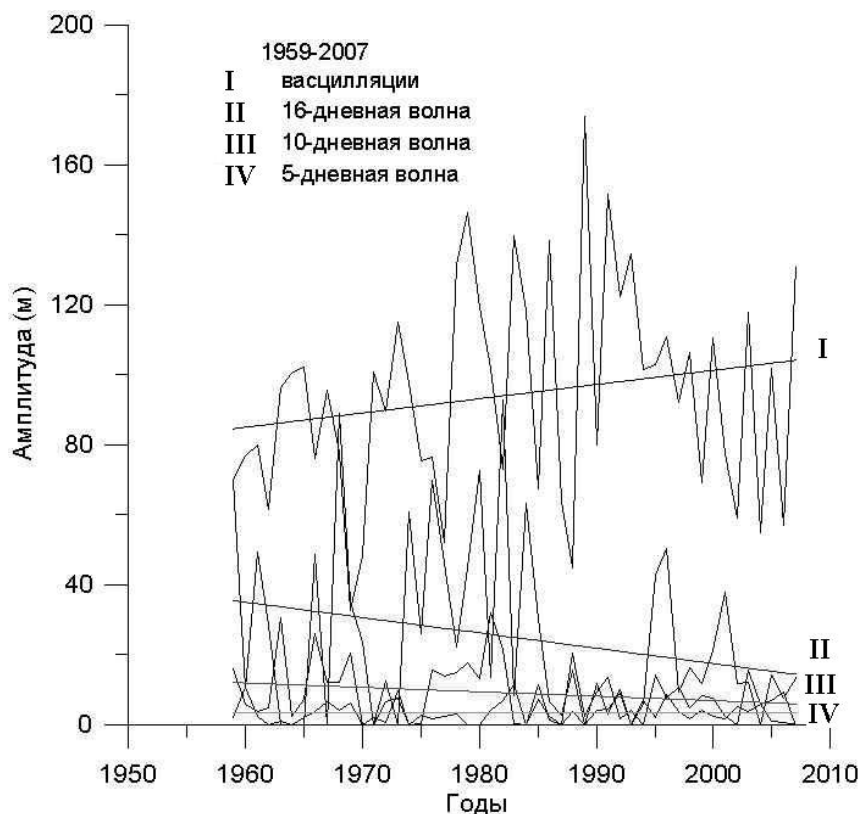


Рисунок 4 – Изменение амплитуды геопотенциальной высоты для васцилляций, 5,10 и 16-дневной волны с $m=1$ на уровне 30 гПа и на 62° с.ш., 1959-2007.

Рисунок 4 показывает чистый отрицательный тренд для 10-дневной волны. Линейное уменьшение составило 5 м. Наиболее сильная изменчивость амплитуд наблюдается с 1960 по 1980 гг. Амплитуда 16-дневной волны также уменьшилась, примерно на 11 м. Изменчивость амплитуд также достаточно сильная.

Далее в **четвертой главе** рассматривается используемая модель МСВА, приводится методика численных экспериментов и анализ результатов.

Модельные расчеты с помощью МСВА показали рост амплитуды СПВ и увеличение внутрисезонной изменчивости, которая характеризует интенсивность стратосферных васцилляций, изменение распределения фазы СПВ1 в тропосфере и нижней стратосфере зимнего полушария, которое отражает изменение условий распространения волны. Рассчитанные по модели изменения среднего зонального потока в тропосфере подобны изменениям, наблюдаемым по данным NCEP/NCAR, т.е. первопричиной климатических изменений тропосферных

струйных течений является изменение распределения среднезональной температуры в тропосфере, а не какие-либо динамические факторы. Наблюдается также незначительное увеличение межгодовой изменчивости амплитуды СПВ1 от 1960 к 2000 году и заметное увеличение внутрисезонной изменчивости амплитуды этой волны.

Приведена оценка внутрисезонной и межгодовой изменчивости амплитуды и фазы СПВ1 (см. рисунок 2).

В Главе 5 представлен анализ долгопериодного хода васцилляций в совокупности с временным изменением индекса QVO и солнечной активностью. Стратосферная динамика весьма чувствительна к изменению внешних факторов, таких как, солнечное излучение, способствуя распространению возникающих флуктуаций метеорологических величин, а следовательно и амплитуд планетарных волн, в тропосферу [2, 4, 20]. Выявить четкий характер связи между васцилляциями амплитуды СПВ1 по данным NCEP/NCAR и изменениями QVO не удалось (Рисунок 5, 6а), значение коэффициента линейной корреляции составило 0.31.

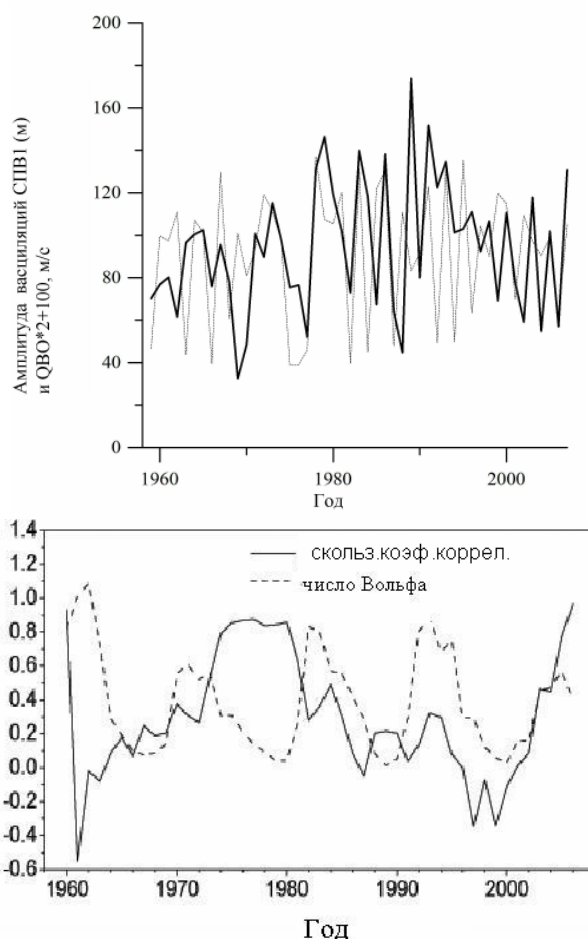


Рисунок 5 – Осредненные за декабрь-февраль васцилляции амплитуды СПВ1 по данным NCEP/NCAR (сплошная) и ветер QVO на уровне 30 гПа, январь (штрих) (верхний); коэффициенты скользящей корреляции между васцилляциями амплитуд СПВ1 по данным NCEP/NCAR, осредненными за декабрь-февраль на широте 62N, и значениями QVO (сплошная), и количеством солнечных пятен за январь (штрих) (нижний).

Более детальное рассмотрение внешнего воздействия солнечной активности на описанные связи было сделано с использованием значений чисел Вольфа. Согласно исследованиям Labitzke, 2006 [20] большое количество солнечных пятен и западные скорости QVO чаще наблюдаются совместно с существованием сильного полярного вихря, что соответствует слабым васцилляциям. Для проверки данного утверждения были рассмотрены несколько типов рассчитанной линейной корреляции для западной и восточной фазы QVO.

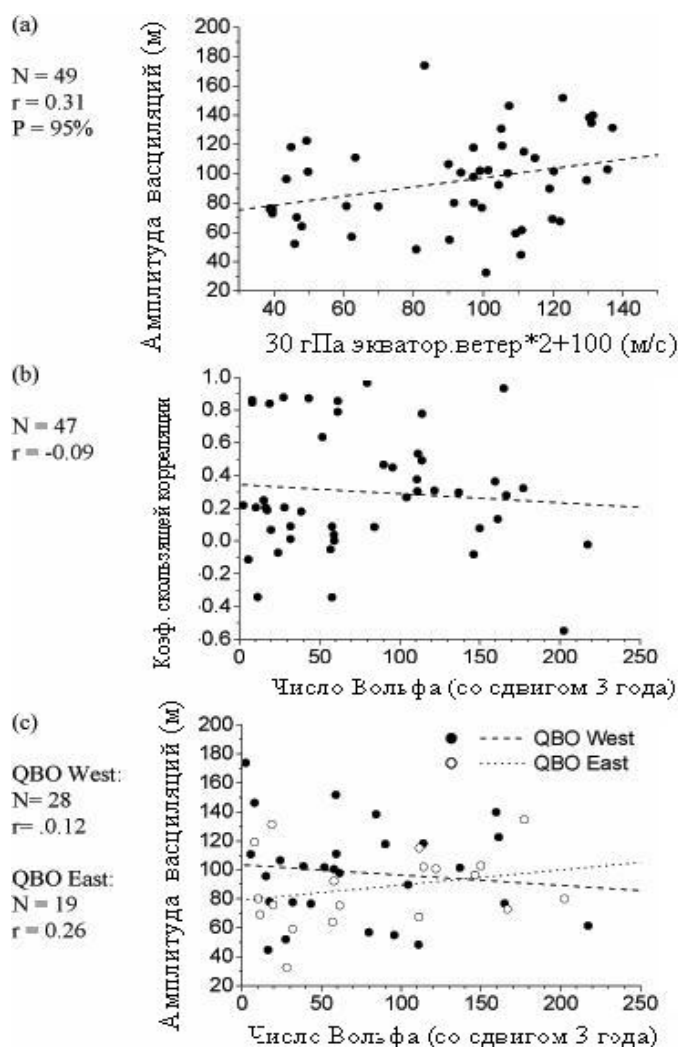


Рисунок 6 – а) Васцилляции амплитуд СПВ1 по данным NCEP/NCAR, осредненные за декабрь-февраль на широте 62N, и значения QVO; б) скользящая корреляция между васцилляциями амплитуд СПВ1 по данным NCEP/NCAR, осредненными за декабрь-февраль на широте 62N, и значениями QVO в зависимости от количества солнечных пятен, сдвинутых на 3 года вперед; в) то же для западного и восточного QVO.

Слабая отрицательная корреляция была выявлена между солнечной активностью и васцилляциями СПВ1 при западном QBO (Рисунок 6). Для восточного QBO характерна положительная скользящая корреляция васцилляций и количества солнечных пятен.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В заключении сформулированы основные результаты, полученные при работе над диссертацией.

1. Анализ данных NCEP/NCAR показал, что на высотах ~10 км в январе наблюдаются значительные изменения среднезональной температуры, скорость имеет различный знак в высоких и низких широтах.
2. Выявлено изменение положения и интенсивности тропосферной струи в зимнем полушарии, которое соответствует увеличению широтного градиента температуры, максимум тропосферной струй смещается к высоким широтам.
3. В среднем за период с декабря по февраль амплитуда СПВ1 в северном полушарии возросла. Модельные расчеты распространения СПВ1 с использованием линейаризованной модели и распределений фонового зонального ветра, характерных для 1960 и 2000 гг., показали усиливающуюся активность СПВ в северном полушарии.
4. Обнаруженное увеличение амплитуды СПВ1 должно приводить к усилению взаимодействия планетарной волны со средним потоком, что, в свою очередь, является причиной усиления амплитуды стратосферных васцилляций. Этот факт подтвердился при анализе амплитуд возмущений геопотенциальной высоты с помощью построения вейвлет спектров для СПВ и бегущих волн. Спектры амплитуд возмущений геопотенциальной высоты для васцилляций СПВ и бегущих на запад волн, осредненные за интервал 1959 – 2007 гг., показали усиление колебаний амплитуды СПВ1 зимой в северном полушарии и уменьшение активности бегущих волн. Максимумы, наблюдаемые в амплитудах бегущих на запад волн, могут быть интерпретированы как резонансные колебания атмосферы (нормальные атмосферные моды).
5. Результаты, полученные при анализе данных NCEP/NCAR за временной интервал 1959 – 2007 гг., свидетельствуют о наличии климатической изменчивости динамического режима стратосферы в зимний период. Модельные расчеты с помощью МСВА подтвердили рост амплитуды СПВ и увеличение внутрисезонной изменчивости, которая характеризует интенсивность стратосферных васцилляций.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о значимых изменениях динамики стратосферы за последние 50 лет, которые должны проявиться также и в тропосфере.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

- 1 Канухина А.Ю., Нечаева Л.А., Погорельцев А.И. Климатические изменения температуры и зонального потока в тропосфере и нижней стратосфере по данным NCEP ре-анализа. Тез. докл. Трудов международной школы-конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Изменение климата и окружающей среды»– СПб: Изд. «Гранд», 2005 . – с. 86
- 2 Канухина А.Ю., Нечаева Л.А., Суворова Е.В., Погорельцев А.И. Долгопериодные изменения температуры, зонального потока и стационарных планетарных волн в стратосфере. //Тезисы докладов II конференции молодых ученых Национальных гидрометеорологических служб стран СНГ “Новые методы и технологии в гидрометеорологии”–Росгидромет, Москва.– 2-3 октября, 2006.– с.39.
- 3 Канухина А.Ю., Нечаева Л.А., Суворова Е.В., Погорельцев А.И. Климатические тренды температуры, зонального потока и стационарных планетарных волн по данным NCEP/NCAR ре-анализа// Известия РАН. Физика атмосферы и океана, Вып. 43, №6, 2007.– с. 754 – 763.
- 4 Kanukhina A. Y., Suvorova E. V., Nechaeva L. A., Skrygina E. K., and Pogoreltsev A. I. Climatic variability of the mean flow and stationary planetary waves in the NCEP/NCAR reanalysis data// Special Issue: SI04: The fourth IAGA-ICMA-CAWSES Workshop /Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere, Ann. Geophys. – 2008. –26. – P. 1233-1241. www.ann-geophys.net/26/1233/2008/
<http://www.ann-geophys.net/26/1233/2008/angeo-26-1233-2008.html>
- 5 Kanukhina A., Ch. Jacobi, and A. Pogoreltsev. Stratospheric vacillations, QBO, and solar activity/ Rep. Inst. Meteorol. Univ. Leipzig. – 2008. – 42. – P. 183-192. http://www.uni-leipzig.de/~jacobi/docs/LIM_Bd_42.pdf

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1 Baldwin M.P. and Dunkerton T.J. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes// Science. – 2001. – V. 294. – P. 581-584.
- 2 Baldwin M.P., Thompson D.W.J., Shuckburgh E.F., Norton W.A., Gillett N.P. Weather from the stratosphere// Science. – 2003 – V. 301. – P. 317-319.
- 3 Baldwin M.P., Stephenson D.B., Thompson D.W.J., Dunkerton T.J., Charlton A.J., O’Neill A. Stratospheric memory and skill of extended-range weather forecasts// Science. – 2003. – V. 301.– P. 636-640.
- 4 Baldwin M.P., Dunkerton T.J. The solar cycle and stratosphere-troposphere dynamical coupling// J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2005. – V. 67. – P. 71-82.
- 5 Холтон, Дж. Р. Динамическая метеорология стратосферы и мезосферы / Дж. Р. Холтон.- Л.: Гидрометеоиздат, 1979.- 224 с.-(Пер. с англ.)
- 6 Kalnay, E., et al. The NCEP/NCAR reanalysis project/E. Kalnay, et al.//Bull. Amer. Meteorol. Soc.- 1996.- V. 77.- P. 437-471.

- 7 Pogoreltsev A.I. Simulation of planetary waves and their influence on the zonally averaged circulation in the middle atmosphere//Earth, Planets and Space. 1999. V. 51. №. 7/8. P. 773-784.
- 8 Pogoreltsev A.I. Numerical simulation of secondary planetary waves arising from the nonlinear interaction of the normal atmospheric modes//Phys. Chem. Earth (Part C). 2001. V. 26. № 6. P. 395-403.
- 9 Ивановский А.И., Семеновский Ю.В. К теории глобальных волн во вращающейся стратифицированной атмосфере // Метеорология и гидрология. 1968. № 7. С.19-30.
- 10 Бидлингмайер Е.Р., Ивановский А.И., Погорельцев А.И. Формирование вертикальной структуры акустико-гравитационных волн процессами молекулярной вязкости и теплопроводности//Изв.АН СССР, физика атмосферы и океана.1990. Т. 26, № 7. С. 682-692.
- 11 Медведев А.С., Погорельцев А.И., Суханова С.А. Моделирование глобальной структуры и проникновение через экватор стационарных планетарных волн//Изв.АН СССР, физика атмосферы и океана. 1991. Т. 27, № 8. С. 813-824.
- 12 Fröhlich K., Pogoreltsev A., Jacobi Ch. Numerical simulation of tides, Rossby and Kelvin waves with the COMMA-LIM model//Adv. Space Res.- 2003.- V. 32.- P. 863-868, doi:10.1016/S0273-1177(03)00416-2.
- 13 Fröhlich K., Pogoreltsev A., Jacobi Ch. The 48-layer COMMA-LIM model//Rep. Inst. Meteorol. Univ. Leipzig.- 2003.- V. 30.- P. 157-185.
- 14 Гаврилов Н. М., Погорельцев А. И., Якоби К. Численное моделирование влияния широтно-неоднородных гравитационных волн на циркуляцию средней атмосферы// Известия РАН, ФАО.- 2005.- Т. 41.- № 1.- С. 12-21.
- 15 Pogoreltsev, A.I., A.A. Vlasov, K. Fröhlich, and Ch. Jacobi. Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere// J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2007. – 69. – P. 2083-2101, doi:10.1016/j.jastp.2007.05.014.
- 16 Погорельцев А.И. Генерация нормальных атмосферных мод стратосферными вадцилляциями, Изв. РАН, Физика атмосферы и океана, 2007, Т. 43, № 4, 463-475.
- 17 Nigam, S. The sensitivity of stationary waves to variations in the basic state zonal flow/S. Nigam, R.S. Lindzen// J. Atmos. Sci.- 1989.- V. 46.- P. 1746-1768.
- 18 Chen P. Propagation of planetary waves between the troposphere and stratosphere/W.A. Robinson//J. Atmos. Sci.- 1992.- V. 49.- P. 2533-2545
- 19 Kistler R., et al. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-rom and documentation/R. Kistler, et al.//Bull. Amer. Meteorol. Soc.- 2001.- V. 82, № 2.- P. 247-267.
- 20 Labitzke, K. Solar variation and stratospheric response. Space Sci. Rev. – 2006. – 125. – P. 247-260.

АВТОРЕФЕРАТ

А. Ю. Канухина