

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Российский государственный гидрометеорологический университет»

На правах рукописи

УДК 550.385.21

Суворова Екатерина Владимировна

**ИСТОЧНИКИ СОЛНЕЧНЫХ НЕМИГРИРУЮЩИХ ПРИЛИВОВ  
В СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ**

25.00.30 - метеорология, климатология, агрометеорология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет» (РГГМУ).

*Научный руководитель:*

Доктор физико-математических наук, профессор  
Погорельцев Александр Иванович

*Официальные оппоненты:*

Доктор физико-математических наук, профессор  
Гаврилов Николай Михайлович

Доктор технических наук  
Кулешов Юрий Владимирович

*Ведущая организация:*

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва

Защита состоится « 09 » декабря 2010 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д.212.197.01 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, г.Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д.98

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета.

Автореферат разослан « 05 » ноября 2010 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета Д.212.197.01

доктор географических наук, профессор



А.И.Угрюмов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы**

В настоящее время не вызывает сомнения факт взаимодействия динамических процессов в различных атмосферных слоях. Основным механизмом такого взаимодействия является вертикальное распространение атмосферных волн различных временных и пространственных масштабов и их воздействие на тепловой и динамический режим средней и верхней атмосферы при диссипации. Изучение вопросов генерации, распространения и последующей диссипации атмосферных волн является одной из важнейших фундаментальных задач физики атмосферы и околоземного космического пространства. Последние десятилетия характеризуются интенсивным развитием аэрокосмических и наземных систем наблюдения за тепловой структурой, газовым составом и динамическим режимом атмосферы на различных высотах. Анализ результатов обработки экспериментального материала, полученного с помощью наземных и спутниковых наблюдений, показывает постоянное присутствие в атмосфере Земли волновых возмущений глобального масштаба (планетарных волн и приливных колебаний). Особую важность указанные исследования играют в связи с необходимостью обнаружения и контроля возможных климатических изменений, связанных с антропогенными и естественными воздействиями.

На высотах мезосферы и нижней термосферы (МНТ) приливные колебания являются наиболее сильными регулярными возмущениями, которые оказывают существенное влияние на суточные и сезонные вариации температуры, атмосферных газовых составляющих и динамический режим этого региона. Кроме этого, МНТ, как область атмосферы, одинаково чувствительна к внешнему воздействию солнечных и/или геомагнитных возмущений и к процессам, протекающим в нижележащих слоях атмосферы. Расположенная примерно между 50 и 120 км выше земной поверхности эта высотная область не только важна для воздушного и космического транспорта (например, расчет траекторий ракет, суборбитальных сверхзвуковых воздушных космических кораблей), пропуска-

ния радиоволн, эффектов космической погоды и авроральных явлений, но и также для понимания изменчивости атмосферы Земли в целом. Ее динамика, химия и термическая структура могут изменяться довольно быстро вследствие природных или антропогенных изменений в энергетике данного региона.

Фундаментальным свойством атмосферных волн (в том числе и атмосферных приливов) является то, что при распространении из нижней атмосферы в вышележащие слои они переносят энергию и импульс. При диссипации на высотах средней и верхней атмосферы они передают энергию и импульс среде, воздействуя тем самым на тепловой баланс и циркуляцию атмосферы. Таким образом, распространение и диссипация атмосферных волн является одним из основных механизмов, отвечающих за энергетическое и динамическое взаимодействие различных слоев атмосферы.

В последние десятилетия возрос интерес к исследованиям процессов в МНТ: в численных моделях верхняя граница поднялась до термосферных высот, усовершенствовалась наземная техника наблюдений, появились спутники, аппаратура которых позволяет измерять температуру и ветер в МНТ области. Сочетание моделирования и наблюдений позволило улучшить наши знания о МНТ и посмотреть на земную атмосферу в целом. Изучению динамических процессов и волновых движений в атмосфере Земли уделяется большое внимание в крупных международных проектах по солнечно-земной физике: Planetary Scale Mesopause Observing System (PSMOS, 1998-2002 гг.) и Solar-Terrestrial Energy Program -- Results, Applications and Modeling Phase, (S-RAMP, 1998-2002 гг.), Climate and Weather of the Sun-Earth System (CAWSES, 2004-2008 гг., CAWSES-2, 2009 – настоящее время), - организованных и проводимых под руководством Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics (SCOSTEP). Все это подтверждает, что изучение вопросов генерации, распространения и взаимодействия глобальных атмосферных волн (в частности атмосферных приливов, как наиболее регулярных колебаний атмосферы), а также их влияния на циркуляцию и термический режим атмосферы является важной и актуальной проблемой, имеющей большое научное и практическое значение.

Актуальность изучения динамических процессов, в том числе приливных колебаний, обусловлена тем, что пространственные неоднородности различных масштабов, наблюдаемые в МНТ области и в верхней атмосфере, играют важную роль в функционировании современных технологических систем. Так атмосферные приливы оказывают влияние на траектории спутников, чувствительных к вариациям плотности атмосферы, а также космических аппаратов при их возвращении на Землю. Точность определения местоположения объектов с помощью спутниковых навигационных систем, а также в задачах радиолокации и радиопеленгации в значительной степени зависит от знания состояния ионосферы, которое определяется системой нейтральных ветров на термосферных высотах. Средняя и верхняя атмосфера довольно быстро реагирует на климатические изменения в нижних слоях. Таким образом, проводя мониторинг состояния МНТ области, изучая изменчивость приливов, атмосферных волн и газовых составляющих, можно получить информацию об изменении радиационных, химических и динамических процессов в атмосфере.

Несмотря на то, что изучению вопросов генерации и распространения волн глобального масштаба в атмосфере Земли уделялось в последние десятилетия большое внимание, проводимые теоретические исследования были выполнены в основном в линейной постановке, т. е. использовали теорию возмущений. Кроме этого, в существующих нелинейных моделях общей циркуляции из-за недостатка эмпирического материала, как правило, задаются среднезональные распределения атмосферных составляющих. Целью настоящей работы являлись учет долготных неоднородностей озона в модели средней и верхней атмосфере (МСВА) и оценка относительного вклада радиационных и нелинейных источников немигрирующих приливов, распределенных в средней атмосфере. Кроме этого, были также рассмотрены нелинейные взаимодействия основных компонент первичных мигрирующих приливов.

## **Цель диссертационной работы**

Изучение относительной роли различных источников немигрирующих приливов, распределенных в средней атмосфере, а также влияния атмосферных приливов на общую циркуляцию и термическую структуру.

## **Поставленные задачи**

1. Создание глобальной полуэмпирической трехмерной модели распределения концентрации озона.
2. Модификация МСВА для учета трехмерного поля озона.
3. Исследование влияния долготных неоднородностей озона на атмосферную циркуляцию, генерацию немигрирующих приливов и стационарных планетарных волн (СПВ).
4. Оценка роли нелинейного взаимодействия СПВ и мигрирующих приливов в генерации немигрирующих приливов.
5. Оценка генерации и распространения атмосферных приливов с учетом их нелинейного взаимодействия между собой и с планетарными волнами.

## **Научная новизна**

Новизна работы заключается в том, что впервые была создана глобальная полуэмпирическая модель трехмерного распределения концентрации озона, которая была использована при моделировании общей циркуляции с помощью МСВА. На основе полученных с помощью МСВА модельных расчетов впервые был оценен относительный вклад таких источников генерации немигрирующих приливов, как неоднородный по долготе нагрев атмосферы за счет поглощения молекулами озона солнечной радиации и нелинейное взаимодействие между мигрирующими приливами и СПВ. Для оценки нелинейного взаимодействия приливных атмосферных колебаний между собой была проведена дополнительная модификация радиационного блока модели с целью фильтрации термических источников той/иной приливной компоненты.

## **Достоверность результатов**

Достоверность полученных в диссертации результатов расчетов общей циркуляции атмосферы, планетарных волн и приливов в средней атмосфере определяется тем, что проведенный теоретический анализ и численное моделирование, основанные на уравнениях гидродинамики, согласуются с результатами анализа наблюдений.

## **Практическая и научная значимость**

Практическая и научная значимость работы заключается в том, что результаты численного моделирования атмосферных приливов могут быть использованы для планирования экспериментов и для интерпретации результатов наблюдений. Методы анализа приливов и планетарных волн, применяемые в работе, могут быть полезны также для анализа глобальных нестационарных волновых процессов в других областях физики, например, в физике ионосферы и магнитосферы. Следует также отметить, что разработка относительно простой механистической модели МСВА необходима для интерпретации результатов расчетов с помощью полных (т.е. включающих процессы, протекающие в тропосфере) моделей общей циркуляции, которые практически также сложны для понимания, как и реальная атмосфера. Разработанная глобальная полуэмпирическая трехмерная климатологическая модель распределения концентрации озона может быть использована для валидации численных моделей состава атмосферы.

## **Положения, выносимые на защиту:**

- глобальная полуэмпирическая трехмерная модель распределения концентрации озона в нижней и средней атмосфере;
- результаты моделирования общей циркуляции средней атмосферы, СПВ и приливных колебаний с учетом трехмерного распределения концентрации озона, полученные с использованием модели МСВА;

- результаты сравнительных оценок вклада радиационных эффектов, обусловленных долготной неоднородностью распределения озона, и нелинейного взаимодействия СПВ с зональным волновым числом  $m=1$  и мигрирующих суточного ( $m=1$ ) и полусуточного ( $m=2$ ) приливов в генерацию немигрирующих приливов;
- результаты анализа эффектов нелинейного взаимодействия первичных приливных колебаний между собой;
- оценка воздействия атмосферных приливов на циркуляцию и термическую структуру в мезосфере и нижней термосфере.

### **Личный вклад автора**

Все представленные в диссертации результаты получены автором самостоятельно. В опубликованных в соавторстве с коллективом кафедры метеорологических прогнозов работах по разработке МСВА автору принадлежит участие в постановке задач, их решении, математической обработке и анализе исходных данных и результатов моделирования.

### **Апробация и публикация работы**

Работа выполнялась на метеорологическом факультете РГГМУ с 2007 по 2010 гг. Тема диссертации включена в план работ кафедры метеорологических прогнозов. Результаты работы докладывались и обсуждались на 7ой Международной школе молодых ученых «Физика окружающей среды» (Красноярск, Россия, 2008 г.), 4ой Генеральной ассамблеи SPARC (Болония, Италия, 2008 г.), 5ом Совещании IAGA/ICMA/CAWSES «Долгопериодные изменения и тренды в атмосфере» (Санкт-Петербург, Россия, 2008 г.), Международном симпозиуме стран СНГ «Атмосферная радиация и динамика» (Санкт-Петербург, Россия, 2009 г.), Международной Байкальской молодежной научной школе по фундаментальной физике (Иркутск, Россия, 2009 г.), XVI Международном симпозиуме с элементами научной школы для молодежи «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск, Россия, 2009 г.), Генеральной ассамблеи европей-



ского геофизического общества EGU (Вена, Австрия, 2010 г.), 8ой Международной школе молодых ученых «Физика окружающей среды» (Томск, Россия, 2010 г.), Симпозиуме Научного комитета по Солнечно-Земной Физике SCOSTEP (Берлин, Германия, 2010 г.), 38ой Научной Ассамблеи COSPAR (Бремен, Германия 2010 г.). Также результаты докладывались на Ученом совете РГГМУ (2008 г., 2009 г., 2010 г.)

Основные результаты по теме диссертации представлены в 10 статьях, включая 6 в реферируемых журналах.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 133 наименований. Рукопись содержит 115 страниц, 29 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, научная новизна, практическая и научная значимость работы. Дается определение гравитационным (лунным) и термическим (солнечным) атмосферным приливам. Отмечается, что только термические солнечные приливы (в частности суточная и полусуточные компоненты) имеют заметные амплитуды, чтобы играть существенную роль в динамике стратосферы и мезосферы. Поэтому солнечные приливы являются объектом исследования в данной работе.

В **первой главе** дан аналитический обзор исследований солнечных приливов, начиная с 1970 г. Приливы представляют собой единственный пример вынужденных колебаний, характеристики источников которых в той/иной степени довольно хорошо известны. Если в случае гравитационных приливов как пространственные распределения, так и частоты потенциала приливообразующих сил известны совершенно точно, то для солнечных тепловых приливов известны лишь частоты источников, и поскольку распределение приливообразующих сил зависит от распределения озона и водяного пара в атмосфере, их пространственную структуру приходится задавать приближенно. Таким образом, периоды солнечных приливов представляют собой гармоники с частотами, кратными частоте вращения Земли (24, 12, 8, 6, 4 часа). Существует два типа термических приливов: мигрирующие и немигрирующие. Наиболее хорошо изучены так называемые мигрирующие приливы, т.е. те составляющие приливных колебаний, фазовая скорость которых направлена на запад и совпадает со скоростью движения Солнца. Основными мигрирующими приливами являются суточный (период  $T=24$  часа и зональное волновое число  $m=1$ ) и полусуточный ( $T=12$  часов и  $m=2$ ). Они возбуждаются вследствие поглощения солнечной радиации молекулами тропосферного водяного пара и стратосферного озона. Немигрирующие приливы имеют фазовую скорость отличную от скорости движения Солнца и могут распространяться на запад, восток или оставаться стоячими. Наибольшие амплитуды имеют немигрирующие составляющие атмосферных суточных ко-

лебаний с зональными волновыми числами  $m=0, 2$  и полусуточные компоненты с  $m=1, 3$ . Источниками немигрирующих приливов являются долготные неоднородности нагрева, обусловленные зависимостью распределений поглощающих газов (паров воды в тропосфере и озона в стратосфере) от долготы, а также нелинейное взаимодействие мигрирующих приливов с СПВ. Как правило, СПВ с зональным волновым числом  $m=1$  (СПВ1) преобладает в зимней средней атмосфере и в дальнейшем мы будем рассматривать только нелинейные взаимодействия мигрирующих приливов с этой волной. На основе анализа исследований приливных компонент, сделан вывод, что немигрирующие приливы гораздо менее изучены. Это связано с ограниченным количеством спутниковых наблюдений, недостатками моделей, а иногда и просто игнорированием роли этих приливов в динамике, химии и энергетике верхней атмосферы.

Также в первой главе рассматривается влияние концентрации озона на термический и динамический режимы средней и верхней атмосферы. Недавние исследования показали, что учет зональных неоднородностей в концентрации озона может сказываться на условиях распространения СПВ за счет дополнительно возбуждения этих волн при поглощении солнечного излучения, а также через изменение индекса рефракции этих волн, обусловленное изменением температуры атмосферы в результате нагрева/охлаждения в озонном слое. Показано также, что за последние десятилетия долготные неоднородности озона на средних и высоких широтах северного полушария на высоте 10 гПа в январе существенно усилились. Сделан вывод о том, что эти изменения сказываются на интенсивности СПВ в стратосфере, т.е. приводят к климатической изменчивости динамического режима, что в свою очередь приводит к усилению амплитуд приливов и указывает на необходимость учета крупномасштабных долготных неоднородностей в озоне при моделировании общей циркуляции средней атмосферы.

Во **второй главе** рассматриваются классическая (нелинейная) и линейная теории приливов, а также механизм нелинейного взаимодействия волн между собой. Основные характеристики атмосферных приливов описаны классической теорией приливов Чепмена и Линдзена (1970). Пренебрегая механическим форсингом и диссипацией, эта теория предполагает, что распространяющиеся атмосферные приливы могут рассматриваться как линейные возмущения некоего первоначального неподвижного среднезонального состояния (при этом атмосфера изотермическая и горизонтально стратифицирована). Два основных вывода классической теории:

- атмосферные приливы – это моды атмосферных колебаний, широтная структура которых описывается функциями Хафа;
- амплитуды приливных колебаний в средней атмосфере растут с увеличением высоты экспоненциально.

Классическая теория атмосферных приливов хотя и сильно идеализирована, но, тем не менее, успешно объяснила основные наблюдаемые характеристики приливов. Однако существует ряд противоречий между наблюдениями и классической теорией, которые успешно разрешила линейная теория. Например, хотя высокая зональная фазовая скорость приливов, на первый взгляд, сводит к минимуму роль адвекции за счет среднего зонального потока, линейная теория Линдзена и Хонга (1974) показала, что пренебрежение этим эффектом в классической теории как раз и может служить причиной расхождения между наблюдаемым и рассчитанным уровнями обращения фазы полусуточных приливов (50 и 25 км, соответственно).

Механизм нелинейного взаимодействия как квадратичный нелинейный процесс был предложен Тайлтелбаумом и Виалом (1991) для интерпретации наблюдаемой модуляции приливных амплитуд как взаимодействия между приливами и планетарными волнами, что подтвердило известную теорию Спиззинчино (1969): если сигнал, состоящий из двух косинусоидальных волн с зональными волновыми числами и частотами  $(m_1, \omega_1)$  и  $(m_2, \omega_2)$ , проходит через некую квадратичную систему, то на выходе из системы будут наблюдаться четы-

ре волны:  $(2m_1, 2\omega_1)$  и  $(2m_2, 2\omega_2)$ ,  $(m_1 + m_2, \omega_1 + \omega_2)$ ,  $(m_1 - m_2, \omega_1 - \omega_2)$ . Таким образом, например, в результате взаимодействия СПВ1 и мигрирующих суточного ( $m=1$ ) и полусуточного ( $m=2$ ) приливов образуются немигрирующие суточный ( $m=2$ ) и полусуточный ( $m=1$ ) приливы, соответственно.

Также во второй главе дано краткое описание работ, посвященных моделированию атмосферных приливов, и описание используемой нами в диссертационной работе трехмерной нелинейной модели общей циркуляции атмосферы МСВА.

В **третьей главе** рассматривается глобальная полуэмпирическая трехмерная модель распределения концентрации озона. Известно, что озон поглощает главным образом в диапазоне 200 – 300 нм (с максимумом поглощения при  $\lambda = 255$  нм); этот нагрев уравнивается выхолаживанием, связанным с излучением в полосе 9,6 мкм озона. Таким образом, поглощением озоном коротковолновой солнечной радиации и излучение в ИК области спектра служат важнейшей составляющей радиационного и термического баланса атмосферы. Для создания глобальной полуэмпирической модели распределения озона был проведен анализ доступных данных по распределениям озона, ассимилированных в моделях ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) и представленных в Berlin Model. Анализ GOME данных показал наличие уровней, на которых частично/полностью отсутствуют данные о концентрации озона. Сравнительный анализ отклонения относительной концентрации озона от среднесезональных значений на уровнях 30 и 10 гПа по данным ECMWF и GOME для января (осреднено за 1996 – 2005 гг.) показал, что структура долготных неоднородностей озона схожа на обоих уровнях, несмотря на различия в схемах ассимиляции данных в моделях ECMWF и GOME. Отметим, что изменчивость концентрации озона по долготе проявляется не в отдельных слоях, а охватывает всю толщу стратосферы, что, в свою очередь, должно оказывать влияние на нагрев атмосферы за счет поглощения молекулами озона солнечной радиации. Максимальные дол-

долготные неоднородности концентрации озона наблюдаются зимой в широтном диапазоне 60 – 80 N, причем преобладает зональная гармоника (стационарная планетарная волна) с волновым числом  $m=1$ , т.е. СПВ1. Амплитуда долготных неоднородностей на уровне 10 гПа в GOME данных примерно в два раза больше по сравнению с ECMWF данными, однако на уровне 30 гПа амплитуды долготных неоднородностей озона в обоих данных качественно и количественно подобны. Основываясь на результатах сопоставления моделей ECMWF и GOME, в созданной трехмерной полуэмпирической модели распределения концентрации озона от уровня 1000 гПа до 30 гПа используются ECMWF данные, от 10 до 0,3 гПа - GOME данные, выше 0,3 и до 0,003 гПа – данные Berlin Model (среднезональные данные). На высотах стратосферы имеется хорошее соответствие используемых нами среднезональных распределений концентрации озона с эмпирической моделью климатологии озона Рандела и Ву (2007).

Для оценки влияния долготных неоднородностей озона на термический режим средней атмосферы был рассчитан нагрев атмосферы за счет поглощения молекулами озона ультрафиолетовой радиации в стратосфере (полоса Хартли (242 – 310 нм) и полоса Хаггинса (310 – 400 нм)) и в тропосфере (полоса Шапюи (400 – 850 нм)). Показано, что наибольший вклад в долготную изменчивость суммарного нагрева на высотах порядка 40-50 км вносит поглощение молекулами озона солнечной радиации в полосах Хартли и Хаггинса, что объясняется расположением максимума нагрева в полосе Шапюи на высоте 20 - 25 км.

В **четвертой главе** приведено описание модельного эксперимента с помощью МСВА для исследования источников немигрирующих приливов, расположенных в средней атмосфере. В качестве нижних граничных условий МСВА на уровне 1000 гПа задавались осредненные за 1992-2002 гг. распределения геопотенциальной высоты и температуры для января, учитывающие среднезональные значения, а также стационарные планетарные волны с зональными числами  $m=1-3$ , которые были получены из данных NCEP/NCAR ре-анализа.

Было проведено два модельных эксперимента (в результате получено два ансамбля решений) по расчету атмосферной циркуляции для условий зимы Северного полушария (январь - февраль). При получении первого ансамбля решений (Ens1) использовалось трехмерное распределение озона с учетом климатических (осредненных за 1996-2005 гг.) долготных неоднородностей озона, полученное с использованием разработанной нами глобальной полуэмпирической трехмерной модели распределения концентрации озона. Во втором случае (Ens2) использовались осредненные по долготе распределения озона на каждом уровне. Каждый из полученных ансамблей включает в себя 10 вариантов (Runs), рассчитанных с различными начальными условиями. Изменение параметров атмосферной циркуляции от варианта к варианту можно интерпретировать как аналог наблюдаемой в природе межгодовой изменчивости. Результаты моделирования показали, что при учете долготных вариаций озона распределение фазы СПВ1 в геопотенциальной высоте существенно не изменилось, а осредненная по ансамблям амплитуда в стратосфере зимнего полушария возросла примерно на 200 м, также среднезональная температура увеличивается на 2 К в высоких широтах на высотах стратосферы, а зональный поток ослабевает на 3 м/с. Для детального исследования источников генерации немигрирующих приливов был выбран вариант расчета Run 8, где разница в амплитуде СПВ1 между ансамблями Ens1 и Ens2 составляет 200 м.

Отметим, что при развитии внезапных стратосферных потеплений (ВСП) амплитуда СПВ1, как правило, возрастает из-за нелинейного взаимодействия волны и зонального потока в стратосфере. Таким образом, доминирующим источником немигрирующих приливов в данном случае следует ожидать нелинейное взаимодействие СПВ1 и мигрирующих приливов. При отсутствии ВСП основным источником немигрирующих приливов, по-видимому, является незональный нагрев, обусловленный долготными неоднородностями озона. Поэтому был проведен анализ временной изменчивости СПВ1 в средних широтах и среднезональной температуры над полюсом для указанного варианта расчета в январе-феврале. Для анализа характеристик мигрирующих и немигрирующих

приливов в МНТ области с учетом одновременного присутствия волновых компонент, распространяющихся на восток и запад, а также с учетом существенной нестационарности их амплитуд, использовалось вейвлет преобразование Морле, которое показало усиление амплитуд приливов во время событий ВСП. Таким образом, для расчета амплитуд приливов выбраны временные интервалы с событиями ВСП и невозмущенной атмосферой. На рисунке 1 представлены амплитуды немигрирующих суточного и полусуточного приливов в меридиональном ветре на высоте 120 км при сильной и слабой СПВ1. Очевидно, что амплитуда немигрирующего суточного прилива при событиях ВСП превышает в 2 раза в низких широтах амплитуду такого же прилива при отсутствии событий ВСП. Амплитуды немигрирующего полусуточного прилива при сильной и слабой СПВ1 имеют также существенные различия (фактор 2 – 3) для всего Южного полушария, что говорит о его распространении через экватор из области генерации в зимней стратосфере.

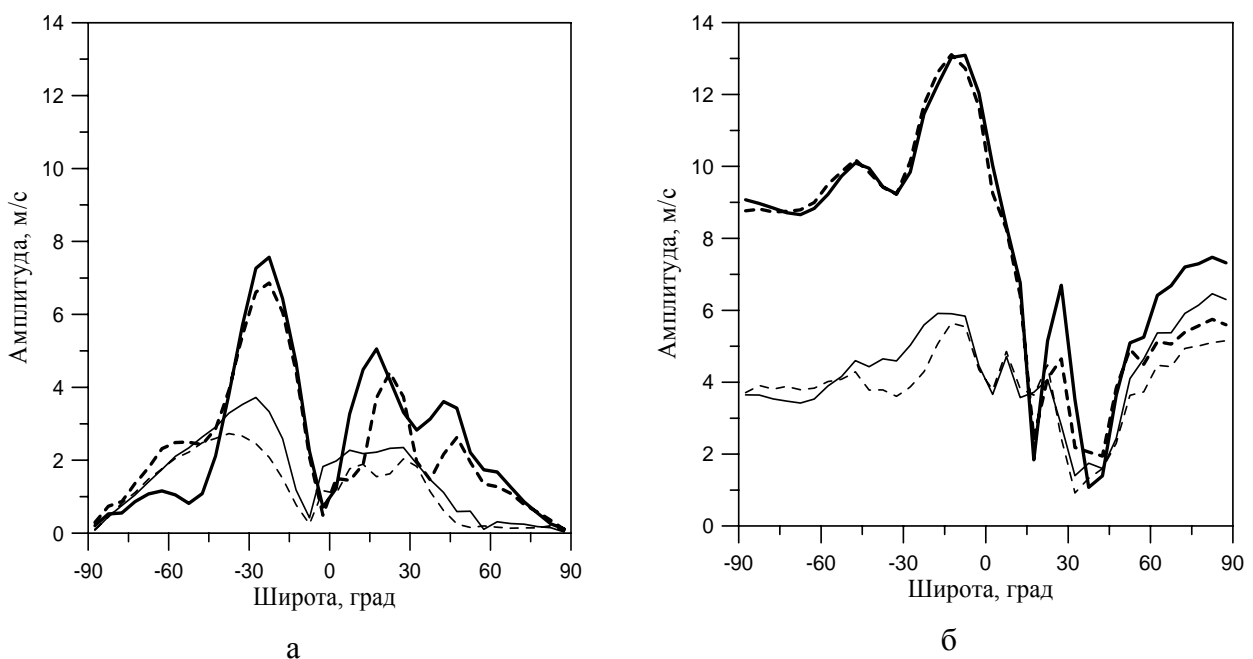


Рисунок 1 - Амплитуды немигрирующих суточного (а) и полусуточного (б) приливов в меридиональном ветре на высоте 120 км при сильной и слабой СПВ1 (толстые и тонкие линии, соответственно). Сплошной линией показаны результаты, полученные с учетом долготных вариаций озона, штриховой – при использовании среднезонального распределения озона.



В пятой главе рассматривается нелинейное взаимодействие приливных компонент, а также их воздействие на среднезональную циркуляцию и термическую структуру в мезосфере и нижней термосфере. Была произведена модификация блока нагрева МСВА, с помощью которой стало возможным фильтровать термические источники различных приливных компонент. Как отмечалось, основным источником мигрирующих приливов является нагрев атмосферы, тогда первая гармоника суммарного нагрева ответственна за генерацию мигрирующего суточного ( $m=1$ ), а вторая – мигрирующего полусуточного ( $m=2$ ) прилива. Проведено три модельных эксперимента для марта месяца:

- F0 вариант расчета: контрольный вариант без каких-либо изменений;
- F1 вариант расчета: фильтрация первой гармоники суммарного нагрева;
- F2 вариант расчета: фильтрация второй гармоники суммарного нагрева.

На рисунке 2 приведены амплитуды мигрирующих суточного ( $m=1$ ) и полусуточного ( $m=2$ ) приливов для контрольного варианта F0 и при фильтрации первой и второй гармоник нагрева (F1 и F2). Видно, что амплитуда суточного прилива пренебрежимо мала при фильтрации первой гармоники нагрева, при фильтрации же второй гармоники она остается неизменной как в F0 варианте. Также наблюдается ослабление амплитуд суточного ( $m=2$ ), 8-часового ( $m=3$ ), 6-часового ( $m=4$ ) приливов. При фильтрации второй гармоники нагрева амплитуда полусуточного прилива достигает 4-5 м/с по сравнению с 25-30 м/с в варианте F0, т.е. дополнительным источником генерации данного прилива является нелинейное взаимодействие суточного прилива с самим собой:

$(-1/24, 1) + (-1/24, 1) = (-1/12, 2)$ . Отметим уменьшение амплитуд полусуточного ( $m=4$ ), полусуточного ( $m=3$ ) и 6-часового ( $m=3$ ) приливов.

Таким образом, очевидно, что в атмосфере существует не только нелинейное взаимодействие приливных компонент между собой, но и их самовзаимодействие, приводящее к дополнительной генерации вторичных приливов.

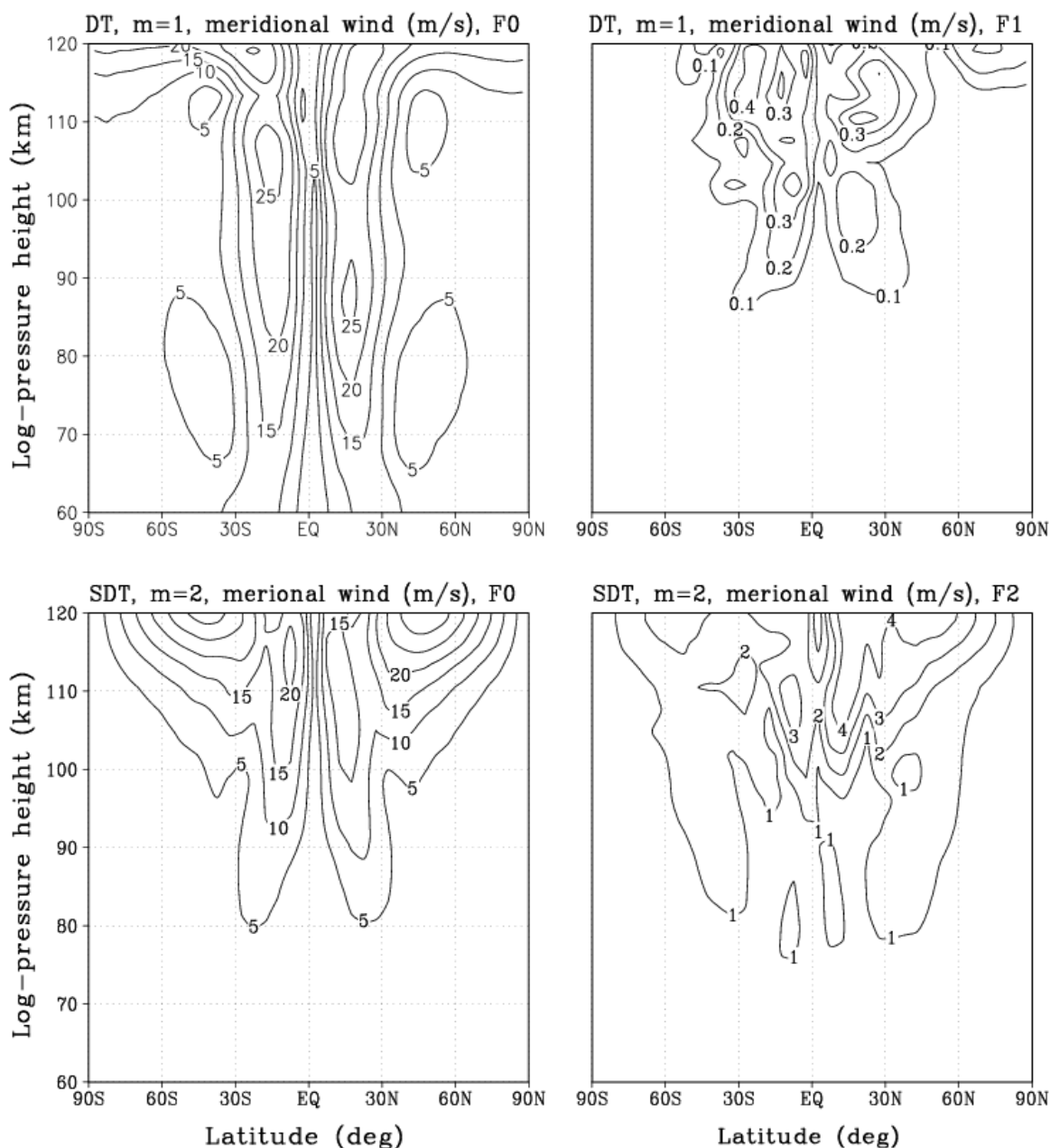


Рисунок 2 - Амплитуды суточного ( $m=1$ ) и полусуточного ( $m=2$ ) приливов (верхние и нижние рисунки) в меридиональном ветре в марте для контрольного варианта F0 и при фильтрации первой и второй гармоник нагрева (F1 и F2, соответственно)

Выше 50-60 км на широтах от  $40^\circ$  ю.ш. до  $40^\circ$  с.ш. в меридиональном ветре наблюдаются циркуляционные ячейки, обусловленные ускорениями, вызванными диссипацией суточного ( $m=1$ ) и полусуточного ( $m=2$ ) приливов. При фильтрации гармоник нагрева как основного источника данных приливов изменяется и структура ячеек циркуляции, при этом максимальные изменения в меридиональном ветре приходятся на высотную область, соответствующую

максимальной амплитуде того или иного прилива (см. рисунок 3). Вклад суточного прилива в генерацию меридиональных ячеек циркуляции составляет порядка 2 м/с на высотах 90-110 км, в то время как полусуточного – 0,6 м/с на высотах 100-110 км.

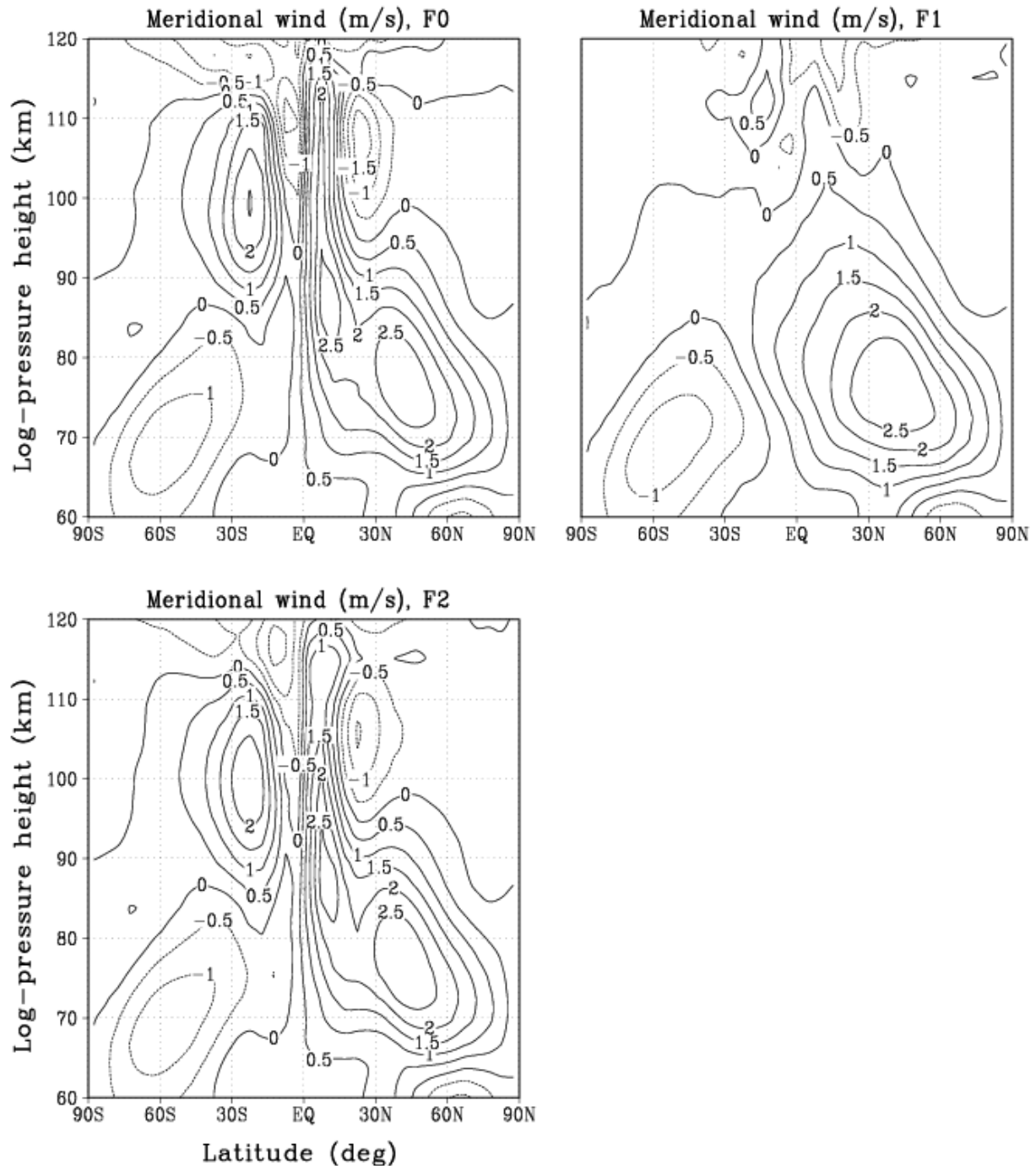


Рисунок 3 – Среднезональный меридиональный ветер в марте для контрольного варианта F0 и при фильтрации первой и второй гармоник нагрева (F1 и F2, соответственно)

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

1. Выполнена модификация радиационного блока МСВА для учета в ней разработанной глобальной полуэмпирической трехмерной модели распределения концентрации озона. Показано, что учет при моделировании долготных неоднородностей озона приводит к увеличению амплитуды СПВ1 в геопотенциальной высоте на 200 м в январе.
2. В зимний период, когда планетарные волны в стратосфере хорошо развиты, основной вклад в генерацию немигрирующих приливов вносит нелинейное взаимодействие между мигрирующими приливами и стационарной планетарной волной с зональным волновым числом  $m=1$
3. Учет в модели долготных неоднородностей озона приводит к появлению дополнительных источников немигрирующих приливов, обусловленных неоднородными по долготе суточными вариациями нагрева, вклад которых может быть сопоставим с вкладом от нелинейного взаимодействия при ослаблении амплитуды СПВ1 в стратосфере.
4. Амплитуды немигрирующих суточного и полусуточного приливов при сильной СПВ1 превышают в 2-3 раза аналогичные амплитуды при слабой СПВ1 на высотах мезосферы и нижней термосферы.
5. Показано, что немигрирующий полусуточный прилив с зональным волновым числом  $m=1$  распространяется в мезосферу и нижнюю термосферу Южного полушария через экватор из области генерации в зимней стратосфере.
6. Получено, что дополнительным источником генерации вторичных приливов является не только нелинейное взаимодействие между первичными компонентами приливных колебаний, но и их само-взаимодействие.
7. Показано, что локализованные в низких широтах меридиональные циркуляционные ячейки на высотах мезосферы и нижней термосферы области обусловлены в основном диссипацией мигрирующего суточного прилива.

По результатам диссертационной работы можно сделать следующие **выводы**, объясняющие результаты радарных наблюдений:

- Основным источником наблюдаемых летом над Южным полюсом колебаний ветра с зональным волновым числом  $m = 1$  и периодом  $T = 12$  часов (немигрирующий полусуточный прилив) является нелинейное взаимодействие СПВ1 и мигрирующего суточного прилива в стратосфере зимнего (Северного) полушария.
- Обнаруженные при анализе данных, полученных на сети радиометеорных радаров ячейки меридиональной циркуляции, локализованные в низких широтах на высотах мезосферы и нижней термосферы, обусловлены диссипацией мигрирующего суточного прилива.

### **Обозначения и сокращения**

МНТ	- мезосфера и нижняя термосфера
МСВА	- Модель Средней и Верхней Атмосферы
СПВ	- стационарная планетарная волна
СПВ1	- стационарная планетарная волна с зональным волновым числом $m=1$
ВСП	- внезапное стратосферное потепление

### **Список публикаций по теме работы**

1. 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, 2007. - Т. 43 - № 6 - с.754-763.
2. Kanukhina A.Yu., Suvorova, E.V., Nechaeva, L.A., Skrygina, E.K., Pogoreltsev, A.I. Climatic variability of the mean flow and stationary planetary waves in the NCEP/NCAR reanalysis data//Annales Geophysicae.- 2008.- V. 26 - N. 5 - P. 1233-1241.
3. Суворова Е. В., Погорельцев А.И. Влияние долготных неоднородностей озона на стационарные планетарные волны и термодинамический режим средней

атмосферы // Материалы VII Международной школы молодых ученых «Физика окружающей среды». - Томск: Томский государственный университет, 2008. - с. 93-96.

4. Суворова Е.В., Погорельцев А.И. Генерация немигрирующих атмосферных приливов за счет долготных неоднородностей озона и нелинейного взаимодействия мигрирующих приливов со стационарной планетарной волной // Сборник тезисов. Международный Симпозиум стран СНГ «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД-2009), С-Петербург, 2009. – с.143-144.

5. Погорельцев А.И., Суворова Е.В., Федулина И.Н., Ханна Э. Трехмерная климатическая модель распределения озона в средней атмосфере // Ученые записки РГГМУ № 10, 2009. – с.43-52.

6. Суворова Е.В., Погорельцев А.И. Изменчивость атмосферных приливов в мезосфере и нижней термосфере, обусловленная динамическими и радиационными процессами в стратосфере // Труды XI Конференции молодых ученых "Гелио- и геофизические исследования", БШФФ-2009. Изд-во ИСЗФ СО РАН, Иркутск, 2009. - с.196-199.

7. Pogoreltsev A.I., Kanukhina A.Yu., Suvorova E.V., Savenkova E.N. Variability of Planetary Waves as a Signature of Possible Climatic Changes // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. - 2009.- V. 71.- P. 1529-1539.

8. Суворова Е.В., Погорельцев А.И. Моделирование приливов в средней атмосфере // Материалы VIII Международной школы молодых ученых «Физика окружающей среды». - Томск: Томский государственный университет, 2011. В печати.

9. Суворова Е.В., Погорельцев А.И. Моделирование немигрирующих приливов в средней атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия.- 2011.- Т. 51.- № 1.

10. Портнягин Ю.И., Соловьева Т.В., Мерзляков Е.Г., Погорельцев А.И., Суворова Е.В., Мухтаров П., Панчева Д. Высотно-широтная структура вертикальной компоненты ветра мигрирующего полусуточного прилива в области верхней мезосферы и нижней термосферы (80-100 км) //Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2011.- Т. 47.- № 1.