



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра физики

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
Бакалаврская

На тему Внутрисезонная изменчивость атмосферных приливов и планетарных волн
на основе радарных измерений

Исполнитель Фомин Александр Николаевич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель доктор физ.-мат. Наук, профессор
(ученая степень, ученое звание)

Погорельцев Александр Иванович
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

капу. физ.-м. н. доцент
(ученая степень, ученое звание)

Бобровских А. П.
(фамилия, имя, отчество)

« 10 » 06 2016г.

Санкт-Петербург
2016



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра физики

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
Бакалаврская

На тему Внутрисезонная изменчивость атмосферных приливов и планетарных волн на основе радарных измерений

Исполнитель Фомин Александр Николаевич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель доктор физ.-мат. Наук, профессор
(ученая степень, ученое звание)

Погорельцев Александр Иванович
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

(ученая степень, ученое звание)

(фамилия, имя, отчество)

«__» _____ 2016г.

Санкт–Петербург
2016

Оглавление

| | |
|--|----|
| Использованные сокращения и основные обозначения | 4 |
| Введение..... | 6 |
| Глава 1. Теория..... | 8 |
| 1.1 Атмосферные приливы | 8 |
| 1.1.1 Суточные и полусуточные солнечные приливы..... | 9 |
| 1.1.2 Мигрирующие и немигрирующие приливы..... | 10 |
| 1.2 Планетарные волны | 12 |
| Глава 2. Основные положения о радарном комплексе МК-31 | 16 |
| 2.1 Комплекс МК-31 | 20 |
| 2.2 Область применения | 21 |
| 2.3 Назначение системы и условия применения комплекса МК-31 | 22 |
| 2.4 Устройство и работа комплекса МК-31 | 24 |
| 2.5 Устройство контроля и обработки данных (УКОД) | 27 |
| 2.6 Радиопередающее устройство | 28 |
| 2.7 Имитатор отраженных сигналов (ИОС) | 29 |
| 2.8 Аппаратный бокс | 29 |
| 2.9 Передача данных наблюдений комплекса МК-31 | 30 |
| Глава 3. Результаты..... | 32 |
| 3.1 Некоторые результаты спектрального анализа данных непрерывных измерений параметров ветрового режима на высотах 90 — 100 км | 32 |
| 3.2 Анализ данных ретроспективного анализа MERRA и данных, полученных с радарного комплекса МК-31 | 42 |

| | |
|-------------------------|----|
| Заключение | 51 |
| Список литературы | 55 |

Использованные сокращения и основные обозначения

1. АРМ — автоматизированное рабочее место;
2. АФУ — антенно-фидерное устройство;
3. БД — база данных;
4. БФО — блок формирования опорной частоты;
5. БФР — блок формирования рабочей частоты;
6. ВГВ — внутренние гравитационные волны;
7. ВСП — внезапные стратосферные потепления;
8. ГКРЧ — Государственная комиссия по радиочастотам;
9. ГФО — геофизическая обстановка;
10. ИОС — источник отраженного сигнала;
11. КДК — квази-двухлетние колебания;
12. Метод D1 — метод регистрации скоростей дрейфов ионосферных неоднородностей;
13. Метод D2 — метод радиолокации метеорных следов;
14. МК-31 — универсальный программно-аппаратный комплекс управления, сбора и обработки данных метеорной когерентной УКВ МРЛС;
15. МНТИ — область атмосферы на высотах 80 — 120 км, включающая мезосферу, нижнюю термосферу и ионосферу;
16. МРЛС — метеорная радиолокационная станция;
17. НПО — научно-производственное объединение;
18. РЛС — радиолокационная станция;
19. РП — радиопередатчик;
20. СРЗ — станция ракетного зондирования;
21. ТИАЦ — тематический информационно-аналитический центр;
22. УКВ — ультракороткие волны, 30 - 3000 МГц;
23. УКОД — устройство контроля и обработки данных;

24. УПР— Устройство радиоприемное;
25. УФ — угломер фазовый;
26. ФГБУ — Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение;
27. ЭВМ—электронная вычислительная машина.

Введение

Изучение взаимодействия динамических процессов, протекающих в различных слоях атмосферы Земли, является одной из важнейших фундаментальных задач физики околоземного космического пространства. Последние десятилетия характеризуются интенсивным развитием аэрокосмических и наземных систем наблюдения за состоянием и динамикой атмосферы на различных высотах, идет накопление новых экспериментальных данных, требующих дальнейшего осмысления, обработки и интерпретации. На основе имеющегося экспериментального материала разрабатываются глобальные эмпирические модели атмосферных характеристик, учитывающие временную и пространственную изменчивость метеорологических полей.

Необходимость изучения атмосферных приливов и планетарных волн обусловлена их большим влиянием на траектории спутников, чувствительных к вариациям плотности атмосферы, а также космических аппаратов при их возвращении на Землю. При проведении мониторинга состояния области мезосферы и нижней термосферы (МНТ), изучении изменчивости атмосферных приливов, планетарных волн и газовых составляющих, можно получить информацию об изменении радиационных, химических и динамических процессов в атмосфере в целом.

Благодаря развитию исследования атмосферных процессов приборами, установленными на спутниках, и с развитием сети наземных станций сканирования, а также наличием радиолокационных установок, появилась возможность исследования внутрисезонной, межсезонной и межгодовой изменчивости атмосферных волн различного масштаба и источников возбуждения.

Задача данной работы состояла в рассмотрении внутрисезонной изменчивости атмосферных приливов и планетарных волн на основе радарных измерений за период с 1 декабря 2015 по 27 марта 2016 в городе Кандалакша (67с.ш., 32.5 в.д.).

Глава 1. Теория

1.1 Атмосферные приливы

Волны планетарного масштаба в атмосфере, создаваемые в первую очередь притяжением Солнца (солнечные атмосферные приливы) и Луны (лунные атмосферные приливы) подобны приливам в Мировом океане. Чисто гравитационные приливные волны имели бы весьма малые амплитуды, а связанные с ними колебания атмосферного давления были бы порядка тысячных и сотых долей миллибара. Но к гравитационным составляющим атмосферных приливов присоединяются составляющие, обусловленные суточным ходом температуры (термические атмосферные приливы). Последний дает импульсы к собственным свободным колебаниям в земной атмосфере. Вследствие резонанса с этими свободными колебаниями амплитуды колебаний давления, связанных с солнечными атмосферными приливами, значительно увеличиваются, в особенности возрастает полусуточная составляющая: примерно до 1,5 гПа у экватора и 0,5 гПа в средних широтах. Кроме того, обнаруживаются малые составляющие: 4-х, 6-и, 8-часовая и суточная. Лунные атмосферные приливы, полусуточные, дают амплитуды давления порядка 0,06 гПа в тропиках и 0,02 гПа в средних широтах. В тропических широтах атмосферные приливы, преимущественно солнечные, существенно влияют на суточный ход давления: во внетропических широтах, где амплитуда приливных волн значительно меньше, а непериодические колебания давления велики, эффект атмосферных приливов можно выделить из общего хода давления только с помощью статистической обработки материала наблюдений. [1]

Изучение влияния атмосферных приливов на вращение Земли было стимулировано несколько лет назад значительным повышением точности

наблюдений и увеличением временного разрешения, хотя теория приливов в океане и атмосфере была разработана Лапласом еще в начале XIX в. [2]

1.1.1 Суточные и полусуточные солнечные приливы

Солнечные тепловые приливы возбуждаются радиационным нагревом за счет поглощения солнечной ультрафиолетовой радиации озоном в стратосфере и мезосфере и водяным паром в нижней атмосфере. В атмосфере наблюдается помимо суточного прилива также полусуточный прилив, амплитуда которого на некоторых высотах превышает амплитуду суточного прилива. Причиной существования полусуточных колебаний является тот факт, что термическое возбуждение при суточном движении Солнца не описывается единичной суточной гармоникой, а содержит и более высокие гармоники. Среди них имеется и полусуточная гармоника, обусловленная поглощением солнечной радиации в слое озона, амплитуда которой составляет $1/3$ от соответствующей суточной компоненты возбуждения. Полусуточный прилив возбуждается в первую очередь озонным нагревом в стратосфере и мезосфере. Суточный же прилив вызывается, прежде всего, тропосферным нагревом за счет поглощения радиации водяным паром. Полусуточная мода характеризуется очень большой вертикальной длиной волны и поэтому оказывается в фазе возбуждения, приходящимся на очень глубокий слой. Таким образом, нагрев в озоновом слое способен эффективно возбуждать полусуточный прилив. В противоположность этому, суточный прилив характеризуется модами с малой вертикальной длиной волны, что приводит к быстрому смещению фазы волны по высоте и к самоподавлению возбуждаемых в слое озона мод вследствие их интерференции. [3]

1.1.2 Мигрирующие и немигрирующие приливы

Классическая приливная теория [4] предсказала существование двух классов приливных колебаний: мигрирующие и немигрирующие приливы. Мигрирующие или синхронные Солнцу приливы распространяются на запад с видимым движением Солнца, они возбуждаются вследствие поглощения солнечной радиации молекулами тропосферного водяного пара и стратосферного озона. Их зональные волновые числа (обозначаются буквой m) равны их частотам (в данном случае, частота это количество циклов в сутки, т.е. $24 \text{ часа}/T$, где T – период прилива). Например, зональное волновое число $m = 1$ соответствует мигрирующему суточному ($T = 24 \text{ часа}$), $m = 2$ – мигрирующему полусуточному ($T = 12 \text{ часов}$) приливу. После основополагающей работы по классической приливной теории [4] ученые стали в большей степени развивать реалистичные модели для численного исследования эффектов генерации, распространения и диссипации приливов в атмосфере. Мигрирующие приливы интенсивно изучались с использованием температурных и ветровых данных наземных наблюдений [5] и на основе спутниковых измерений [6,7,8,9,10,11,12,13,14], а также результатов модельных расчетов [15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25].

Немигрирующие или несинхронные Солнцу приливы гораздо менее изучены, что связано с ограниченным количеством наблюдений, недостатками моделей, а иногда и просто игнорированием роли этих приливов в динамике, химии и энергетике верхней атмосферы [26]. Немигрирующие приливы не следуют за Солнцем, но могут распространяться на запад, восток или оставаться неподвижными. Их волновые числа не равны их частотам (количество цикло в сутки). Совокупность эффектов немигрирующих приливов

представляет собой долготную изменчивость амплитуд и фаз суммарных приливных полей [27,9,12].

Приливные компоненты классифицируются согласно направлению их распространения и зональному волновому числу m . Если $m > 0$, то прилив распространяется с запада на восток, если $m < 0$, то с востока на запад, если $m = 0$, прилив стоячий. Иногда используется другая номенклатура: $|m| \geq 0$, а частоты ω (здесь и далее $\omega = 1/T$) могут быть как положительные (волна распространяется на восток), так и отрицательными (волна распространяется на запад).

Выделяют два основных источника немигрирующих приливов: долготно-неоднородный термический форсинг (топография поверхности, географически изменяющиеся источники тепла, изменение солнечного нагрева по долготе) и нелинейное взаимодействие между СПВ (стационарная планетарная волна) и мигрирующими приливами [28,29,30,31,32,33,34]. В работе [31] впервые было указано, что немигрирующий полусуточный прилив главным образом генерируется нелинейным взаимодействием между СПВ с зональным волновым числом $m=1$ и мигрирующим полусуточным приливом в стратосфере и мезосфере. Выделение скрытого тепла в тропических облаках глубокой конвекции зависит от всемирного времени, долготы, широты, сезона года, и является еще одним возможным источником генерации немигрирующих приливов [35,36,37]. Первым дополнительным источником являются долготные неоднородности нагрева атмосферы, обусловленные поглощением солнечной радиации молекулами озона и водяного пара [38,39]. Вторым дополнительным источником служит нелинейное взаимодействие между мигрирующими приливами и неоднородно распределенными по долготе гравитационными волнами [40]. Также исследования показали, что приливы могут распространяться за пределы области образования [41,42]. В работе [43] было предположено, что нелинейное взаимодействие между возбужденными скрытым теплом немигрирующими приливами и квази-СПВ также может быть

дополнительным механизмом генерации, однако, это не было ни доказано, ни опровергнуто. Роль поглощения солнечного излучения в образовании немигрирующих приливов в настоящее время неоднозначна. Модельные результаты [44] показали довольно малый вклад нагрева, но скорости радиационного нагрева, рассмотренные в работе [45], убеждают в необходимости учета радиационных источников.

1.2 Планетарные волны

Атмосферу можно рассматривать как тонкую пленку на вращающейся сфере, обладающую упругими свойствами. В ней возникают волны, охватывающие подчас всю атмосферу. Если фазовая скорость волны намного превосходит скорость частиц в волне, то линейное приближение дает достаточно точный результат; в противном случае выявляются лишь наиболее общие черты атмосферной динамики.[50]

Первое изучение вертикальной планетарной волны было выполнено в работе [51] и авторами был сделан вывод о том, что вертикальное распространение СПВ имеет место быть только, когда западные зональные ветра не превышают некоторого критического значения скорости Россби. Влияние зонального ветра на распространение планетарной волны было названо теоремой Чарни-Дрезина [52]. Автор работы [53] обнаружил, что широтное положение стратосферного струйного течения и, следовательно, вертикальный сдвиг зонального ветра значительно влияют на распространение волн. Вертикальный сдвиг зонального ветра усиливает распространение волны [54] и этот процесс контролируется атмосферной устойчивостью вблизи внетропической тропопаузы [55].

Крупномасштабные долготные неоднородности атмосферных параметров обычно аппроксимируют суммой зональных гармоник, причем на высотах средней атмосферы (15 — 100 км) существенный вклад в долготные вариации вносят только гармоники с малыми зональными волновыми числами, так называемые планетарные волны. Атмосферные волны глобального масштаба могут быть классифицированы по различным признакам:

- источники возбуждения (вынужденные и свободные колебания атмосферы);
- возвращающие силы, отвечающие за возникновение колебаний (инерционные и гравитационные волны);
- горизонтальные (зональные) фазовые скорости (стационарные и бегущие на восток или запад волны);
- условия распространения (вертикально распространяющиеся внутренние и затухающие внешние волны);
- широтная структура (симметричные и антисимметричные относительно экватора моды, экваториально захваченные и внетропические волны) и т. д.

Планетарные волны (ПВ) можно разделить на бегущие (имеющие ненулевую зональную фазовую скорость) и стационарные (СПВ — неподвижные относительно земной поверхности).[50]

Характерной особенностью средней атмосферы Земли является существенная долготная неоднородность (особенно в зимний период) климатических распределений метеорологических параметров в стратосфере. Обычно эти квазистационарные долготные неоднородности аппроксимируют суммой зональных гармоник, причем на высотах стратосферы и мезосферы значимый вклад в долготные изменения вносят только крупномасштабные гармоники с малыми зональными волновыми числами $m=1$ и 2 , получившие

название стационарных планетарных волн (СПВ) — под стационарностью понимается неподвижность этих гармоник относительно земной поверхности.[51] В зимние месяцы при наличии западных (направленных на восток) фоновых ветров СПВ с малыми зональными волновыми числами могут распространяться в среднюю атмосферу [52] и играют существенную роль в формировании теплового и динамического режимов стратосферы, вплоть до высот мезосферы и нижней термосферы. [51]

Планетарные (длинные) или гироскопические волны представляют большой интерес в связи с задачей долгосрочного прогноза погоды. Физической основой возникновения этих крупномасштабных волновых движений является гироскопическая устойчивость вращающейся атмосферы. При этом любое возмущение, наложенное на это вращение, приводит к возникновению волновых движений этого типа. Данный тип волновых возмущений был впервые обнаружен на синоптических картах и изучен Россби. [56] Поскольку возбуждающая их сила Кориолиса пропорциональна угловой скорости вращения Земли вокруг своей оси, период которой равен 24 часа (86400 секунд; угловая скорость и частота обратно пропорциональны периоду). Поэтому волны Россби очень трудно наблюдать.[57]

Планетарные волны (ПВ)— крупномасштабные квазистационарные долготные возмущения параметров атмосферы (стационарные планетарные волны) представляют собой вынужденные колебания атмосферы, которые возбуждаются в тропосфере за счет неоднородности рельефа и нагрева подстилающей поверхности. Однако атмосфера Земли может рассматриваться также как колебательная система, в которой существуют собственные (резонансные) глобальные колебания. Характерные периоды этих волн значительно превышают маятниковые сутки, их длина колеблется в пределах от несколько десятков до несколько тысяч километров, горизонтальные амплитуды при определенных условиях могут достигнуть несколько сот километров. Соответствующие скорости течения имеют порядок 1 — 10 см/с.

При определенных условиях планетарные волны теряют динамическую устойчивость, трансформируясь в синоптические вихри.

Эффективность возбуждения планетарных волн существенно увеличивается при солнечном корпускулярном излучении на атмосферу Земли. Это значит, что солнечная энергия, вносимая в атмосферу потоками заряженных частиц (главным образом в высоких широтах), возбуждая планетарные волны и распространяя их, передается на другие широты и высоты и вызывает там процессы, приводящие к изменению погоды. [55]

Важным свойством планетарных волн 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:

— изменение содержания стратосферного озона влияет на количество ультрафиолетовой радиации, приходящей к земной поверхности, и количество озона в тропосфере;

— 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;

— погода и климат, зависящие от стратосферной динамики. [12]

Глава 2. Основные положения о радарном комплексе МК-31

В пятидесятые годы были достигнуты значительные успехи в разработке надежных методов оперативных метеорологических ракетных измерений, что обеспечило возможность создания глобальной сети станций ракетного зондирования (СРЗ), развивающейся и в настоящее время. На этих станциях измерение таких важных метеорологических параметров, как давление, плотность, температура атмосферы и скорость ветра, осуществляется с помощью относительно небольших и недорогих метеорологических ракет. Эти ракеты используются для зондирования атмосферы до высот 70—80 км примерно один раз в неделю, а при осуществлении специальных программ наблюдений значительно чаще. Таким образом, не только вся стратосфера, но и нижняя часть мезосферы (принятое деление атмосферы на слои смотри на рисунке 2.1) в районах расположения СРЗ уже в настоящее время находится под регулярным метеорологическим контролем. Этого нельзя сказать об атмосферных слоях, расположенных выше 70 км, хотя контроль за развитием физических и динамических процессов в этих слоях так же важен с метеорологической точки зрения. Конечно, измерения атмосферных параметров с помощью ракет и спутников производятся на уровнях, значительно превышающих 70 км. Благодаря им получена значительная часть современных сведений о составе, строении и динамических параметрах атмосферы. В частности, большой объем информации о строении атмосферы получен для высот 150 км и более по результатам спутникового зондирования. Однако в целом измерения метеорологических параметров прямыми методами выше 70—80 км проводятся значительно реже и менее регулярно, чем на более низких уровнях.

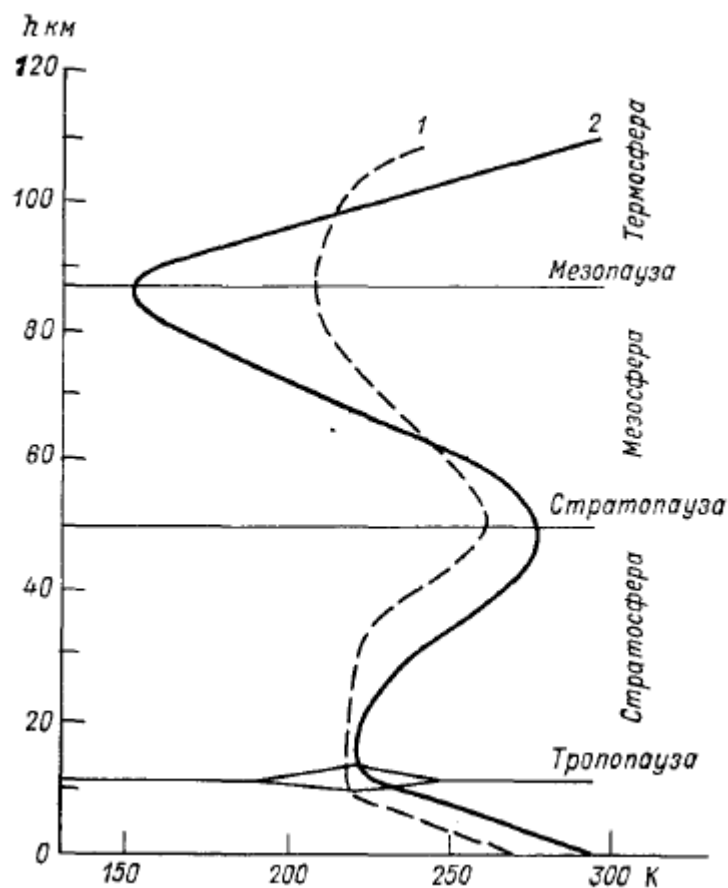


Рисунок 2.1 Средний профиль температуры атмосферы до высоты 110 км в зимнее (1) и летнее (2) время для широты 50° с.ш. Определение различных слоев атмосферы и их чередование на высоте даны согласно модели стандартной атмосферы CIRA-72 (выше 25 км).

Следует добавить, что радиометеорные измерения могут давать информацию о скоростях ветра круглосуточно, независимо от погодных условий, в течение многих лет, причем для аппаратуры средней чувствительности число отдельных регистраций в течение каждого часа составляет примерно 10—100, иногда и более. Многолетние измерения методом радиолокации метеорных следов проводятся Институтом экспериментальной метеорологии в ряде географических пунктов — в Обнинске, на острове Хейса, на станции Молодежная (Антарктида).

Определенными достоинствами обладает метод регистрации скоростей дрейфов ионосферных неоднородностей при наблюдениях в длинноволновом диапазоне (один из вариантов метода D1 — метода регистрации скоростей

дрейфов ионосферных неоднородностей), так же позволяющий получать регулярно информацию о ветровом режиме на высотах 90—100 км. Несмотря на невозможность измерения этим методом в дневные часы и некоторые методические трудности в интерпретации результатов наблюдений, указанный вариант метода D1 позволяет получать многолетние ряды измерений скоростей дрейфов ионосферных неоднородностей на высотах 90—100 км, т. е. в том же высотном интервале, что и метод радиолокации метеорных следов. К достоинствам этого метода следует отнести исключительную простоту требуемой приемной аппаратуры и возможность использования в качестве передающего устройства длинноволновых вещательных радиостанций.

Успешные наблюдения этим методом в течение многих лет, проводятся в обсерваториях Кюлунгсборн и Коллм (Германская Демократическая Республика). С геофизической точки зрения интервал высот, в котором наблюдаются метеорные следы (метеорная зона) и дрейфы ионосферных неоднородностей указанным вариантом метода D1, может быть отнесен к области мезопаузы и нижней термосферы.

Особенно сложен вопрос о получении регулярной метеорологической информации путем прямых измерений на высотах 70—120 км, т. е. на высотах, промежуточных между высотами, где осуществляется регулярное ракетное и спутниковое зондирование. Достоверное определение параметров атмосферы на этих высотах затрудняется вследствие больших систематических колебаний их в течение суток. Так на высоте 90 км амплитуды суточных и полусуточных колебаний плотности и давления атмосферы составляют 10% их средних значений, а значения амплитуд суточного и полусуточного колебания скоростей ветра имеют тот же порядок, что и средние в течение суток скорости ветра, и даже превышают их. Следовательно, достоверные значения основных структурных и динамических параметров атмосферы на высотах около 100 км могут быть получены только из совокупности измерений, достаточно хорошо распределенных в течение каждых суток. Трудно ожидать, что в ближайшее время такие измерения могут регулярно проводиться на сети станций ракетного

зондирования. В связи с этим возрастает роль наземных методов, обеспечивающих получение ценной регулярной метеорологической информации о состоянии верхней мезосферы и нижней термосферы. К таким методам относятся прежде всего метод радиолокации метеорных следов (D2) и метод регистрации скоростей дрейфов ионосферных неоднородностей (D1), позволяющие изучать особенности ветрового режима в области высот 80—110 км. Как показывает многолетний опыт наблюдений в различных пунктах земного шара, оба эти метода могут успешно использоваться для систематических измерений скоростей ветра на высотах около 100 км в любых климатических условиях. [3]

Верхняя атмосфера Земли привлекает пристальное внимание исследователей самых различных специальностей. И это не случайно, поскольку именно верхняя атмосфера является переходной областью между околоземным космическим пространством и слоями атмосферы, непосредственно примыкающими к поверхности Земли. Успехи в изучении процессов на больших высотах стали особенно значительными в последние десятилетия в связи с появлением ракетных и спутниковых методов исследования атмосферы.

Особенно широкое распространение получил метод радиолокации метеорных следов. Мотивы, по которым этому методу отдается предпочтение перед другими методами, обеспечивающими проведение синоптических измерений параметров ветрового режима в мезосфере и нижней термосфере, достаточно хорошо сформулированы: «Предпочтение отдается методу радиолокации метеорных следов, поскольку его основные технические характеристики соответствуют требованиям проведения синоптических наблюдений. В этом методе в качестве «датчика» используется само природное явление, поэтому не нужны большие усилия и затраты на изготовление соответствующего оборудования. Наконец, в основе метода лежат достаточно простые представления, что способствует ясному пониманию физики измерений. Применение метеорной радиолокации ограничено, однако, узкой

областью высот 80—110 км. Сейчас нельзя сказать, что метеорная радиолокация является наилучшим методом для сетевых наблюдений за динамикой нижней термосферы, но, несомненно, она обладает неоспоримыми достоинствами для проведения таких наблюдений. В любом случае метод радиолокации метеоров для синоптических исследований верхней атмосферы не может увести нас с правильного пути, поскольку сейчас ясно, что любой другой из имеющихся методов в большей степени отягощен ошибками. Расположение известных метеорных радиолокационных станций, данные которых могут служить для оценок ветра, позволяет сделать заключение, что уже сегодня есть база для проведения синоптических наблюдений циркуляции верхней атмосферы методом радиолокации метеорных следов». [3]

2.1 Комплекс МК-31

Мониторинг геофизической обстановки в области мезосферы, нижней термосферы и ионосферы с применением комплекса МК-31 проводится круглосуточно в автоматическом режиме. Обработка и передача результатов мониторинга с каждого комплекса МК-31 сети мониторинга в тематический информационно-аналитический центр производится в автоматическом режиме через установленные промежутки времени — 10 минут.

Разработанные программные средства извлекают из первичных данных радиолокации параметры объектов отражения:

- наклонная дальность;
- скорость перемещения;
- угловые координаты;
- амплитуду сигнала.

По виду амплитудно-временной и фазо-временной развертки отраженного сигнала, определяются геофизические свойства объектов отражения.

Численность зарегистрированных радиоэхо также является параметром геофизической обстановки. Ее изменение в фиксированном локальном времени от суток к суткам свидетельствует об изменении электронной концентрации в ионосфере. В основном регистрируемые рассеянные назад радиосигналы комплекса МК-31 — это метеорные радиоэхо, которые связаны, прежде всего, с ненасыщенными метеорными следами. Существенно реже регистрируются переуплотненные метеорные следы или следы промежуточного типа.[60]

2.2 Область применения

Комплекс МК-31 представляет собой метеорную ультракоротковолновую (УКВ) радиолокационную станцию (РЛС), являющуюся составной частью сети мониторинга геофизической обстановки (ГФО).

Установлены основные правила подготовки и проведения наблюдений параметров ионизированных неоднородностей в области мезосферы, нижней термосферы и ионосферы (область атмосферы на высотах 80 — 120 км, включающая мезосферу, нижнюю термосферу и ионосферу (МНТИ), диапазон высот 80— 140 км), с применением комплекса МК-31 и представлению полученных результатов наблюдений.[60]

2.3 Назначение системы и условия применения комплекса МК-31

Комплекс МК-31 представляет собой наземную стационарную радиолокационную станцию (РЛС), предназначенную для обнаружения ионизированных метеорных следов и других мелкомасштабных ионизированных неоднородностей естественного и искусственного происхождения в Е-области ионосферы. Комплекс МК-31 позволяет измерять параметры сигналов, отраженных от этих неоднородностей, и определять координаты отражающих центров, радиальные скорости их движения, амплитуды отраженных сигналов, время появления и длительность существования отражений. Эти параметры необходимы для определения ветрового режима и эффектов возмущений в нижней ионосфере с целью мониторинга ее состояния.

Комплекс МК-31 относится к наземным первичным многоцелевым РЛС импульсного типа с селекцией движущихся целей, работающим на фиксированной частоте метрового диапазона в режиме последовательного обзора пространства путем коммутации направлений зондирования.

Комплекс МК-31 является средством измерений и относится к информационным измерительным системам, собираемым и принимаемым как законченные изделия непосредственно на объекте эксплуатации.

В состав комплекса МК-31 (рисунок 2.2) входит несколько функциональных устройств:

- метеорная радиолокационная станция (МРЛС);
- угломер фазовый (УФ);
- источник отраженного сигнала (ИОС);
- устройство контроля и обработки данных (УКОД).

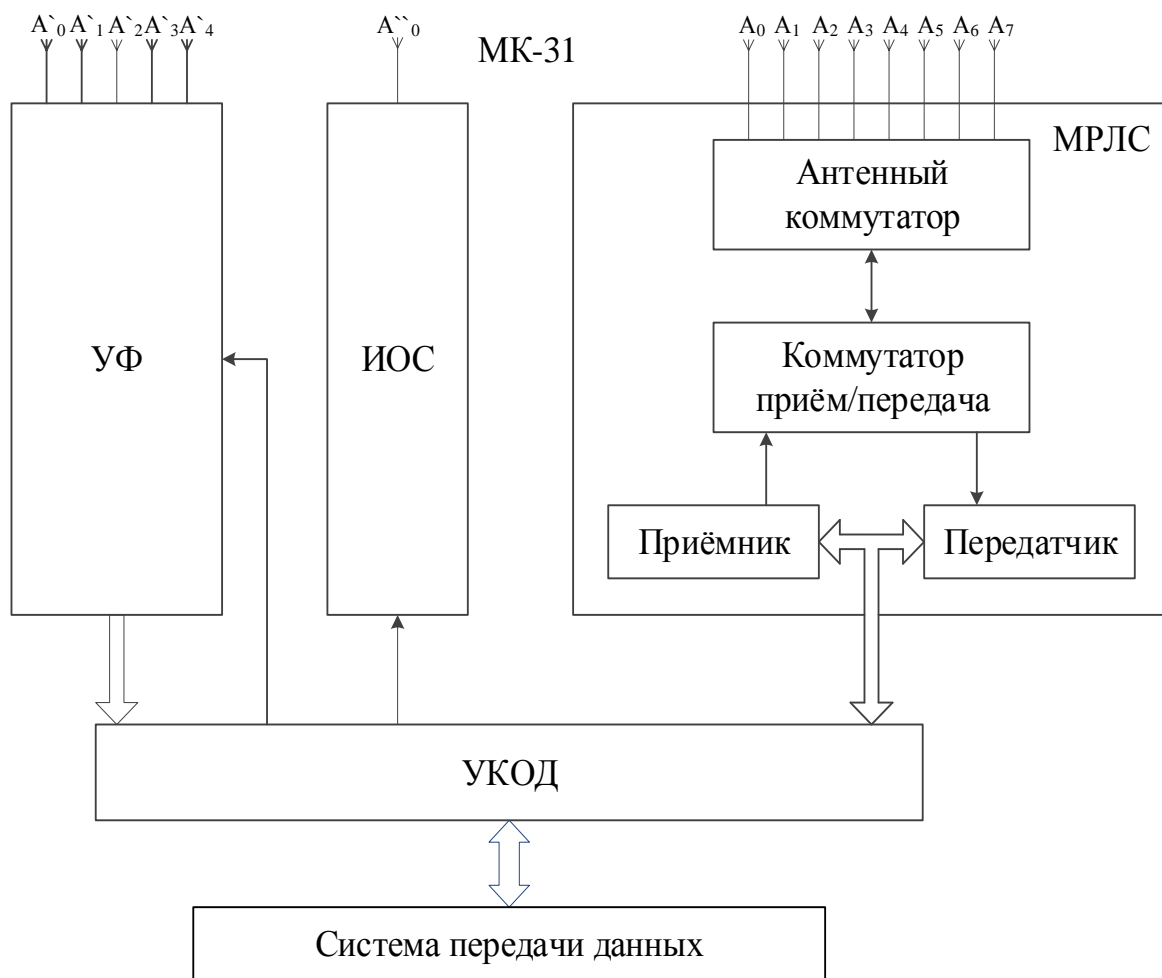


Рисунок 2.2 Функциональная схема комплекса МК-31.

МРЛС является основной частью комплекса МК-31. Она осуществляет функции кругового радиолокационного обзора пространства.

Метеорная радиолокационная станция формирует радиолуч, определяет область, скорость обзора и порядок сканирования пространства, измеряет дальность целей, амплитуду и доплеровский сдвиг частоты принятых сигналов.

УФ является вспомогательной частью комплекса МК-31, который служит для определения угловых координат отражающих ионизированных образований методом фазовой интерферометрии.

Комплекс МК-31 включает многокомпонентные антенно-фидерные устройства АФУ МРЛС (8 антенн) и АФУ УФ (5 антенн), расположенные на открытых площадках.

Электронная аппаратура, комплекса МК-31, размещена в специальном помещении — аппаратном боксе.[60]

2.4 Устройство и работа комплекса МК-31

Для радиолокационной регистрации метеорных следов используется диапазон частот от 30 до 50 МГц. Широкое пространственное распределение метеорных следов и относительно слабый уровень отраженных от них сигналов требуют применения антенных систем с большой областью обзора и одновременно с высокой чувствительностью, которая может быть получена только с помощью антенн с узкими диаграммами направленности.

Эти два взаимоисключающих требования обеспечиваются сложной антенной системой — антенно-фидерным устройством АФУМРЛС, которое состоит из восьми узконаправленных переключаемых антенн. Антенны установлены так, что в результате их диаграммы направленности перекрывают все углы от 0° до 360° по азимуту. Сектор диаграммы направленности по углу места, от 15° до 65° , является оптимальным для наблюдения отражений и от ионизированных метеорных следов и от мелкомасштабных ионизированных неоднородностей в области МНТИ.

Ионизированные метеорные следы являются короткоживущей радиолокационной целью, в связи с этим, скорость переключения антенн должна быть такой, чтобы время обзора всех азимутов было меньше времени существования метеорного следа. Именно этот принцип положен в основу построения АФУ МРЛС. Форма метеорных следов, их ориентация в пространстве и особенности процесса взаимодействия с ними излучаемых

радиолокатором электромагнитных волн требуют применения антенн с горизонтальной поляризацией, что обеспечивают антенны типа «волновой канал», примененные в АФУ МРЛС.

Антенны МРЛС устанавливаются равномерно через 45° по кругу, в пределах 15 м от центра помещения (бокса), в котором размещается радиоэлектронная аппаратура комплекса МК-31, и направлены в сторону от центра круга. Типовая схема размещения комплекса МК-31 показана на рисунке 2.3. При таком способе установки, восемь антенн АФУ МРЛС перекрывают все углы от 0 до 360° по азимуту с неравномерностью минус 3 дБ по мощности, как это показано на рисунке 2.4. Штриховой линией показана диаграмма направленности в горизонтальной плоскости для АФУ УФ.

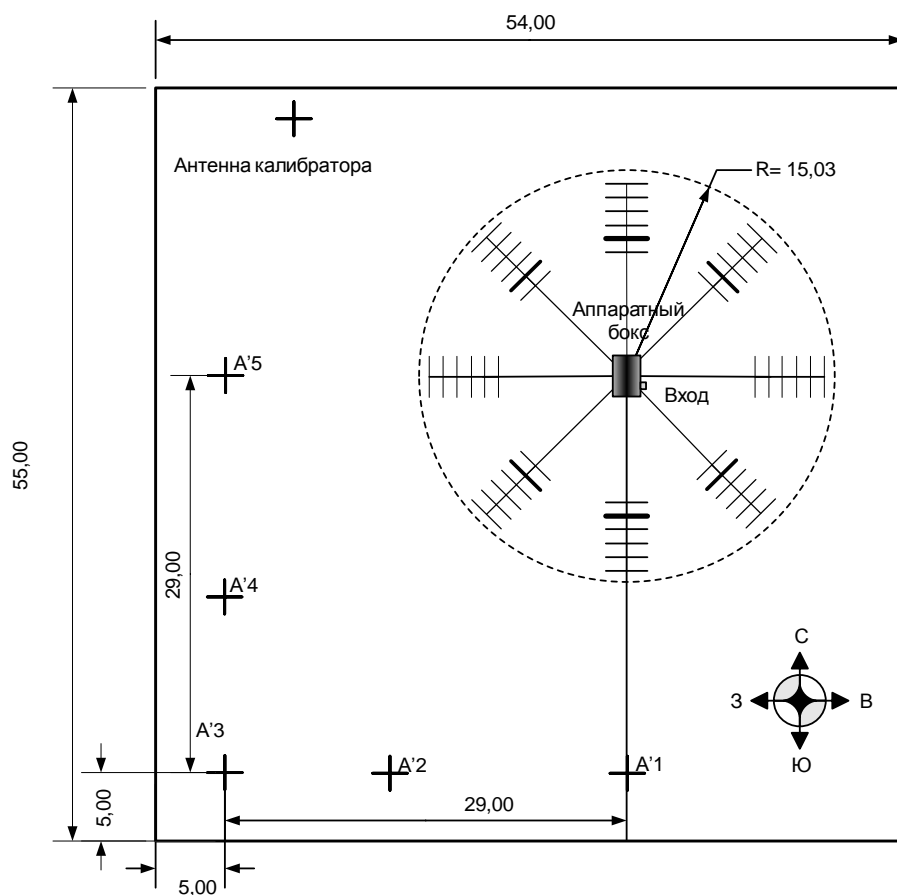


Рисунок 2.3 Типовая схема размещения антенн комплекса МК-31.

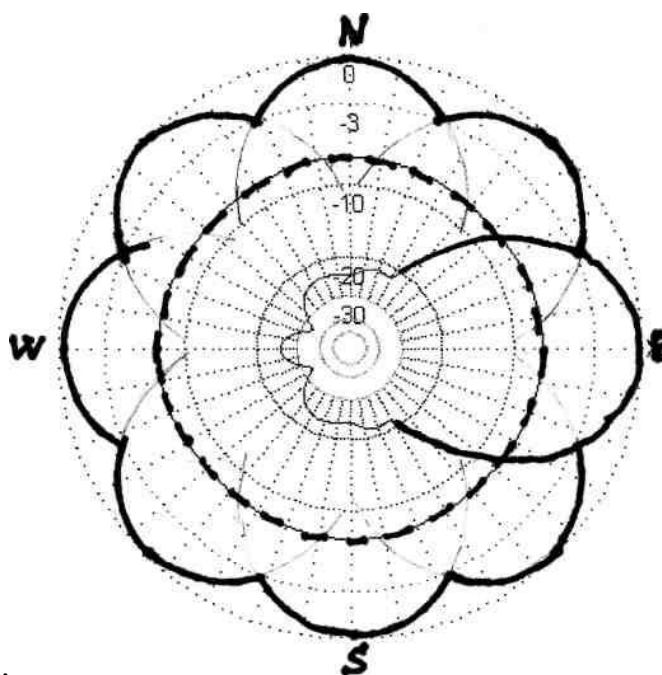


Рисунок 2.4 Диаграмма направленности АФУ МРЛС и АФУ УФ в горизонтальной плоскости.

Круговым сканированием пространства лучами антенн МРЛС управляет антенный коммутатор — блок АК, последовательно подключающий антенны МРЛС к радиопередатчику комплекса МК-31.

В режиме приема блок АК отключает антенну МРЛС от передатчика и подключает ее к приемнику устройства УПР.

Для точного определения угловых координат отражающих целей методом фазовой интерферометрии в комплексе МК-31 используется вспомогательная антенная система — антенно-фидерное устройство, представляющее собой интерферометрическую решетку из пяти антенн АФУУФ типа «кросс-диполи», которые работают только на прием отраженных сигналов из области пространства, облучаемой антеннами МРЛС.

Антенны АФУ УФ имеют круговую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости и диаграмму направленности в вертикальной плоскости близкую к той, которую имеют антенны АФУ МРЛС, что обеспечивает хорошее совпадение обзора пространства с антеннами МРЛС.

Антенны АФУ УФ расположены по сторонам прямого угла, с одной из антенн в его вершине.

Принцип работы фазового угломера основан на том, что отраженные от метеорных следов или ионизированных неоднородностей сигналы приходят в антенны УФ с различными фазами, зависящими от угловых координат центров отражений. Измеряя разности фаз сигналов, принятых различными парами антенн УФ, можно определить угловые координаты местоположения отражающих центров.

Одновременно с описанным процессом передачи — приема радиосигналов в комплексе МК-31 осуществляется независимый от блока АК прием радиосигналов комплексом УФ, состоящим из пяти антенн УФ и устройства УПРУФ и осуществляющим фазовое детектирование отраженных радиосигналов.[60]

2.5 Устройство контроля и обработки данных (УКОД)

Устройство УКОД в составе комплекса МК-31 выполняет функции формирования управляющих импульсов, сбора информации об амплитудно-временных и фазово-временных характеристиках отражённого радиосигнала, а также производит математическую обработку полученной информации для последующей передачи в тематический информационно-аналитический центр.

В процессе работы устройством УКОД осуществляется формирование управляющих импульсов — кода направления зондирования, бланков, модулирующих импульсов передатчика, сигналов управления УВХ и сигналов управления ИОС. Помимо этого, производится анализ принятых от радиоприёмного устройства (УПР) сигналов с целью поиска полезных сигналов

на фоне помех, и по результатам обработки принимается решение о переходе в режим регистрации.

Продолжительность записи в один файл составляет 10 минут, затем текущий файл закрывается и создается следующий. Полученные таким образом файлы данных подвергаются первичной обработке, результаты которой также сохраняются в виде файлов. Также, если указано в настройках, результаты первичной обработки могут быть переданы на сервер для хранения и дальнейшей интерпретации. [60]

2.6 Радиопередающее устройство

Радиопередающее устройство комплекса МК-31, работает в импульсном режиме усиления мощности радиосигнала с рабочей частотой, формируемой в блоке рабочей частоты (БФР) устройства УПР. Выходной сигнал радиопередатчика (РП), мощностью не менее 8 кВт излучается одной из 8 антенн АФУ МРЛС из УПР.

Все блоки РП устанавливаются в напольный шкаф. Шкаф имеет систему воздушного охлаждения и хорошую экранировку электромагнитных излучений, создаваемых размещенными в ней мощными высокочастотными устройствами. [60]

2.7 Имитатор отраженных сигналов (ИОС)

Функции имитатора отражённых сигналов выполняет двухканальный генератор сигналов произвольной формы Tektronix AFG3102.

ИОС применяется для оперативной калибровки АФУ УФ и пяти приемников УФ в процессе работы с целью определения для последующего учета разностей аппаратного набега фаз в приемных каналах УФ.

Величины разностей аппаратного набега фаз изменяются в процессе работы комплекса из-за температурного воздействия окружающей среды на различные компоненты системы и из-за старения компонентов. Для правильной обработки экспериментальных данных достаточно через каждые 10 мин иметь измерения радиосигнала от ИОС.

ИОС включается в режим калибровки через каждые 10 мин работы комплекса МК-31, длительность работы в режиме калибровки составляет ~ 2 с.[60]

2.8 Аппаратный бокс

Аппаратный бокс (далее — бокс) предназначен для размещения и использования по назначению в процессе эксплуатации радиоэлектронного приемо-передающего оборудования и технических средств вычислительной техники и информатики комплекса МК-31, исключения несанкционированного доступа к оборудованию и поддержания необходимого температурного режима.

Наряду с указанным оборудованием в боксе размещаются следующие технические средства и системы:

- a) система электроснабжения, в составе:
 - ввод силового кабеля;
 - электрощит комплектный;
 - распределительная сеть (провода, розетки, выключатели);
- b) заземляющее устройство;
- c) система освещения;
- d) система терморегулирования (электроконвектор, кондиционер);
- e) система охранно-пожарной сигнализации и защиты от несанкционированного доступа.[60]

2.9 Передача данных наблюдений комплекса МК-31

Передача данных радиолокационного зондирования в ТИАЦ осуществляется с помощью программного обеспечения, установленного на сервере станции. Данные представляют собой двоичные файлы размером от 0 до 1,7 МБ, в которых в определённом формате хранятся результаты первичной обработки принятого сигнала. Период появления новых файлов — 10 минут. Модуль передачи данных, работающий на сервере станции, принимает файл, затем определяет, к какому типу измерений он принадлежит, считывает его и передаёт по протоколу PostgreSQL на сервер ТИАЦ. На сервере полученные данные проходят вторичную обработку, результаты обработки сохраняются в базе данных (БД) и отправляются на автоматизированное рабочее место (АРМ) специалиста ТИАЦ. На этом АРМ установлено программное обеспечение, позволяющее в автоматическом или ручном режиме сформировать

информационный бюллетень, содержащий параметры геофизической обстановки, пригодные для отправки получателю информационной продукции ТИАЦ. Бюллетень может рассылаться как одному, так и нескольким получателям.

На рисунке 2.5 представлен вид окна программы визуализации данных, полученных в результате обработки отражений от недоуплотнённых метеорных следов. [60]

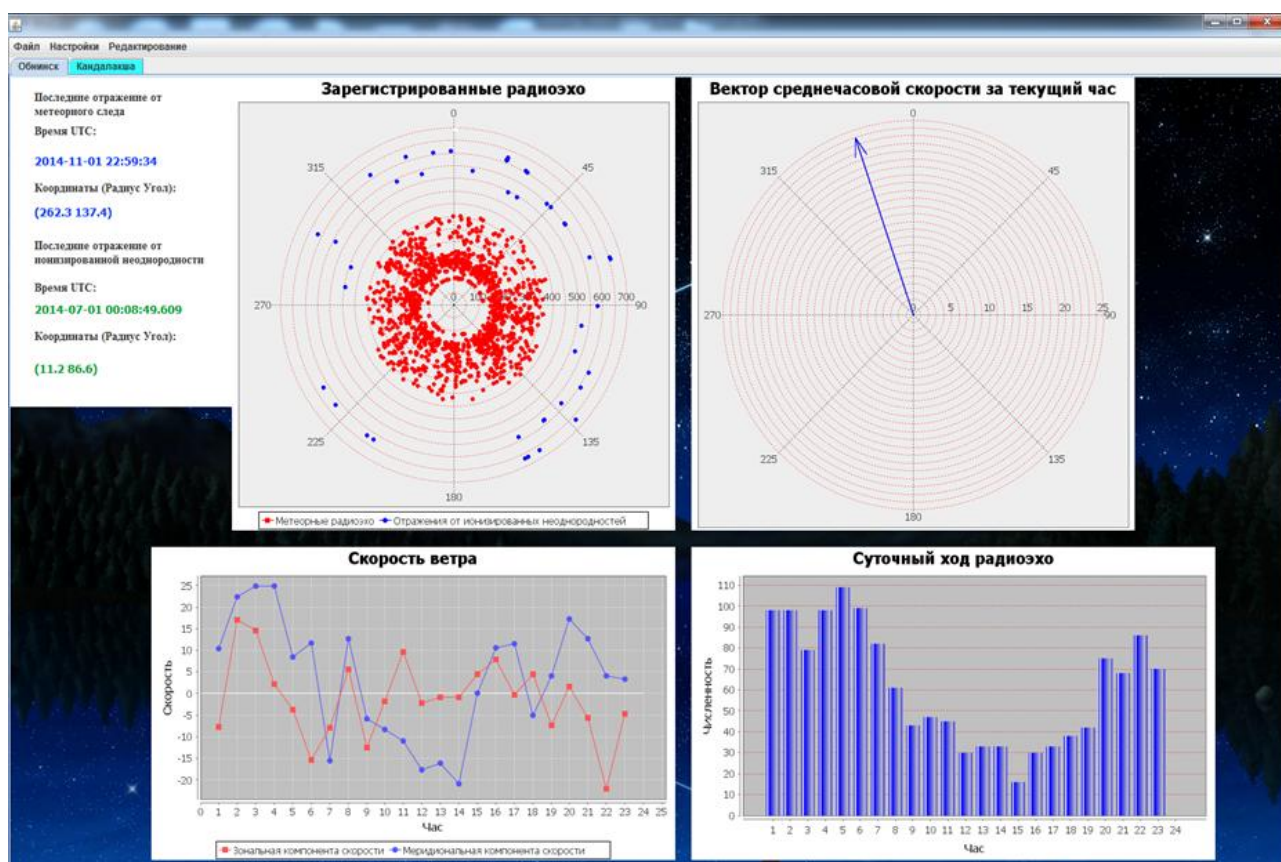


Рисунок 2.5 Вид окна программы визуализации данных метеорных радиоэхэ.

Глава 3. Результаты

3.1 Некоторые результаты спектрального анализа данных непрерывных измерений параметров ветрового режима на высотах 90 — 100 км

В поведении скоростей ветра на высотах 90— 100 км обнаруживаются хорошо выраженные периодичности, связанные с изменениями синоптической обстановки в стратосфере. Данные о ветре по радиозондовым измерениям в интервале высот 5 — 30 км так же содержат некоторые периодические компоненты.

Поскольку атмосфера в определенных условиях ведет себя как взаимосвязанная система, естественно ожидать появления некоторых общих периодичностей в вариациях параметров ветрового режима на различных высотных уровнях. Особенно важным представляется изучение основных характеристик колебаний скоростей ветра в интервале периодов 1— 30 суток, включающем в себя периоды естественных синоптических колебаний параметров атмосферы. Спектральный анализ отдельных рядов радиометеорных измерений показал, что участок спектра, соответствующий периодам 1 — 30 суток, характеризуется отчетливо выраженными максимумами спектральной плотности. Наиболее полно эти колебания одновременно для нескольких слоев атмосферы могут быть исследованы при анализе синхронных для разных высотных уровней непрерывных рядов измерений, значительно более продолжительных, чем периоды естественных синоптических процессов. В стратосфере и тропосфере в качестве таких рядов используются данные непрерывного радиозондирования атмосферы на высотах 5— 30 км с дискретностью 4 точки в сутки. Непрерывные ежедневные измерения скоростей ветра радиометеорным методом, начатые в Обнинске в

ноябре 1972 г., предоставляют в наше распоряжение достаточно продолжительный ряд данных для высот 90—100 км. Общие периодичности на различных высотных уровнях выявлялись нами с помощью спектрального анализа компонентов ветра. Вычисление спектров проводилось на электронных вычислительных машинах (ЭВМ) с помощью разработанной программы, в которой применен алгоритм «быстрого преобразования Фурье». В этой программе количество подвергаемых анализу индивидуальных значений, равноотстоящих по времени друг от друга, должно равняться 2^n , где n — целое число. Минимальное значение n равно 6, что соответствует ряду 64 значений.

С целью выявления основных периодичностей в колебаниях скоростей ветра на различных высотных уровнях для зимнего сезона (17 ноября 1972 г.— 20 марта 1973 г.) был выполнен спектральный анализ данных о преобладающем ветре для метеорной зоны (95 км), стратосферы (25, 20, 15 км) и тропосферы (10 и 5 км). Для высот 95 км использовались результаты непрерывных радиометеорных (Обнинск) и ионосферных измерений (Кюлунгсборн— Коллм) скоростей ветра. Данные радиозондирования были взяты для трех пунктов — Долгопрудный (Московская область), Сухиничи (Калужская область) и Берлин. Для расчета использовались реализации за 64 и 128 суток с интервалом дискретности 1 сутки для Кюлунгсборна— Коллма и 6 ч для остальных пунктов. На рисунке 3.1 представлены автоспектры зональной и меридиональной скорости ветра, вычисленные по полному зимнему периоду (4 месяца) для Обнинска, Долгопрудного и Сухиничей. По оси абсцисс откладывается период (T) в сутках, по оси ординат— безразмерная величина, равная значению логарифмической спектральной плотности P_{qq} , нормированному на дисперсию $\sigma = \int_0^\infty P_{qq} d \ln f$. При таком выборе координат площадь под кривыми, описывающими спектры, имеет смысл энергии.

Рассмотрим спектры отдельно для каждой высотной зоны (тропосфера, стратосфера и метеорная зона). На метеорных высотах основной максимум спектральной плотности в колебаниях зональной составляющей заключен между периодами 10—18 суток. Четко выражен вторичный максимум в окрестности четырехсуток. Кроме того, можно отметить слабый максимум для периода порядка двух суток. В спектре меридиональной составляющей для высоты 95 км основной максимум смещен в сторону больших периодов по сравнению со спектром зонального ветра и расположен в области 16—23 суток. Помимо основного, хорошо выражены максимумы, соответствующие периодам 4—6 и 2—3 суток.

На всех стратосферных высотах спектры для Долгопрудной и Сухиничей (рисунок 3.1) обнаруживают главный максимум около 16 суток для зонального и 21 суток для меридионального ветра. На высотах 15—20 км хорошо выражен максимум около 8 суток (зональная составляющая). Максимум в области периода 10 суток, наблюдающийся в спектрах меридионального ветра на высотах 20 и 25 км, на уровне 15 км смещается к периоду 13 суток, более характерному, как будет показано далее, для тропосферных уровней. Можно отметить так же максимум 4—6 суток, который достаточно отчетливо выражен на большинстве стратосферных спектров.

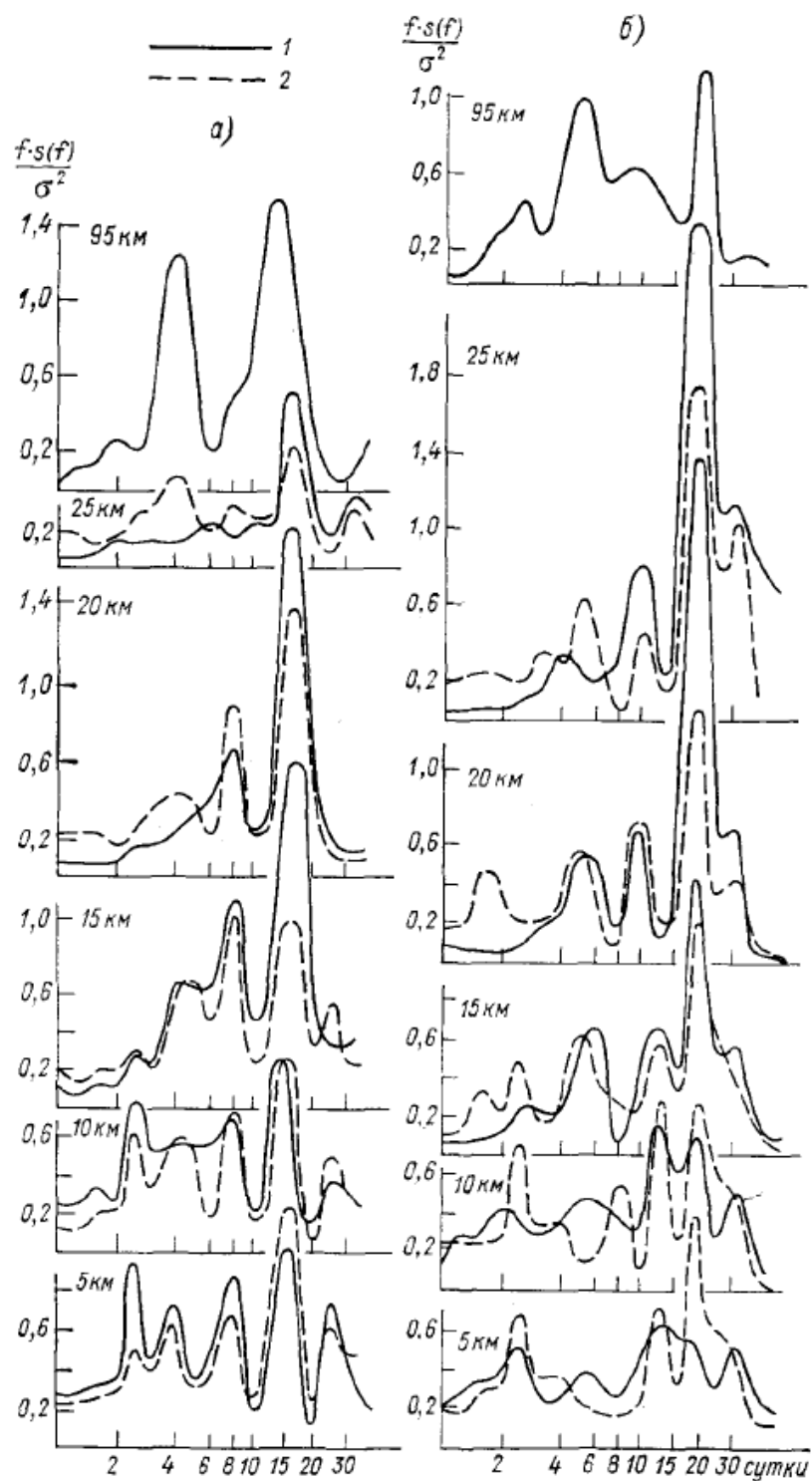


Рисунок 3.1 Автоспектры зональной (а) и меридиональной (б) составляющих скоростей преобладающего ветра для периода с 20 ноября 1972 г. по 20 марта 1973 г., вычисленные по данным измерений в Обнинске (95 км), на станциях Долгопрудный (1) и Сухиничи (2).

Более сложный вид имеют спектры для тропосферы. Главный максимум спектральной плотности зонального ветра заключен между 12 и 18 сутками. Следующие по величине максимумы соответствуют периодам 2—3 и 8 суток. В спектрах для меридионального ветра, по данным для ст. Сухиничи, выделяются два максимума в области 21 и 13 суток; для Долгопрудного (10 км) эти максимумы разделены менее четко, а на высоте 5 км они сливаются в один широкий максимум в интервале периодов 10—23 суток.

Таким образом, сравнение спектров для двух пунктов радиозондирования атмосферы, удаленных друг от друга на расстояние порядка 200 км, в целом позволяет говорить о их хорошем совпадении, особенно для стратосферы. Этот факт отчасти дает методическое обоснование совместному анализу полученных в рассматриваемых пунктах радиозондовых и радиометеорных данных, так как последние представляют собой некоторые средние характеристики циркуляции в области метеорной зоны с горизонтальными размерами около 500x500 км.

С целью проверки стабильности основных периодов колебаний в течение исследуемого зимнего периода вычислялись спектры по более коротким, двухмесячным реализациям со сдвигом через неделю по всему 4-х месячному ряду данных. Таким образом, для ряда данных за 4 месяца было получено по 10 спектров для каждого параметра. Результаты такого спектрального анализа данных, полученных в Долгопрудном и Обнинске, приведены на рисунке 3.2. Хорошее совпадение спектров, рассчитанных по полной реализации (4 месяца), и средних по 10 спектрам, вычисленным по двухмесячным реализациям, указывает на достаточно высокую стабильность основных периодов колебаний скорости ветра за рассматриваемый зимний период. Вместе с тем следует указать на появление в спектрах по более коротким реализациям дополнительных максимумов. Например, в усредненных спектрах (2-месячные реализации) меридионального ветра на высотах 95, 10 и 5 км отчетливо проявляется максимум в области 6—8 суток, не отмечавшийся на спектрах по полной реализации.

На рисунке 3.3 представлены результаты вычисления автоспектров по данным за 4 месяца для Кюлунгсборна — Коллма (95 км) и Берлина (5—20 км). На высоте 95 км основной максимум зональной составляющей относится к интервалу 6 — 12 суток, т. е. он смещен в сторону меньших, по сравнению с Обнинском, периодов. В тоже время на высотах 5 — 20 км основной максимум приходится на период, близкий к 21 суткам в стратосфере и к 26 суткам в тропосфере, т. е. основной максимум, по сравнению со спектрами, относящимися к пунктам Долгопрудный и Сухиничи, смещен в сторону больших периодов.

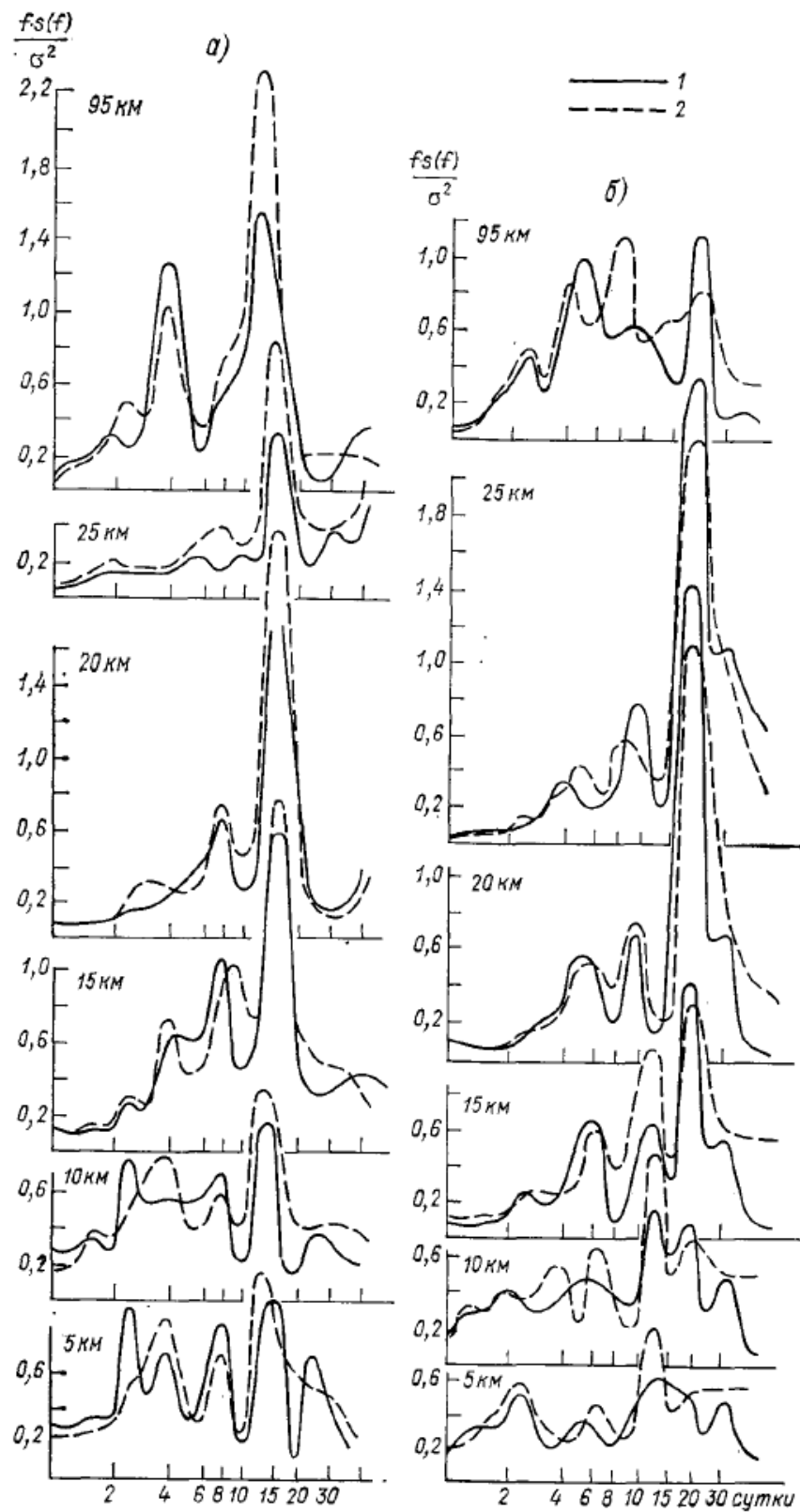


Рисунок 3.2 Автоспектры зональной (а) и меридиональной (б) составляющих скоростей преобладающего ветра, вычисленные по полной 4-месячной реализации результатов измерений в Обнинске (95 км) и на станции Долгопрудный (1) в зимний период 1972-73 г. и средние по 10 спектрам для двухмесячных реализаций (2).

Синоптический анализ зимней циркуляции в 1972-73 г., показал, что нарушения стабильного ветрового режима на всех рассматриваемых высотных уровнях связаны с периодическими миграциями к высоким широтам антициклонических образований, приводящими к деформации циклонического полярного вихря, его раздвоению и изменению местоположения. Поскольку периоды таких процессов составляют, как следует из синоптических карт, 2—3 недели, следует ожидать появления в спектрах колебаний метеорологических элементов значительных максимумов в указанном интервале периодов. По-видимому, наблюдаемые нами основные максимумы в спектрах зональной составляющей ветра, наиболее сильно изменяющейся при указанных возмущениях зимней циркуляции, связаны именно с этими процессами. Неполное совпадение основных периодов колебаний зонального компонента, отмечающееся в различных географических пунктах и на различных высотных уровнях, в этом случае обусловлено, по-видимому, тем, что синоптические образования, связанные с процессами зимних возмущений циркуляции, имеют неоднородную горизонтальную и вертикальную структуру и скорость их распространения в различных географических пунктах и на различных высотах неодинакова. В отличие от спектров зонального ветра в спектрах меридионального ветра по данным для Кюлунгсборна— Коллмай Берлина на всех высотах обнаруживается тот же самый главный максимум 21 суток, который отмечался в спектрах по данным для Обнинска, Долгопрудного и Сухиничи для меридионального компонента преобладающего ветра. Такое хорошее совпадение основных максимумов во всех спектрах для всех пунктов вызывает удивление, поскольку обычно считается, что, по крайней мере, в стратосфере и тропосфере меридиональные ветры являются менее стабильными, чем зональные. Однако представленные спектры могут свидетельствовать о том, что физические факторы, приводящие к колебаниям меридиональной скорости ветра, достаточно стабильны и однородны по пространству.

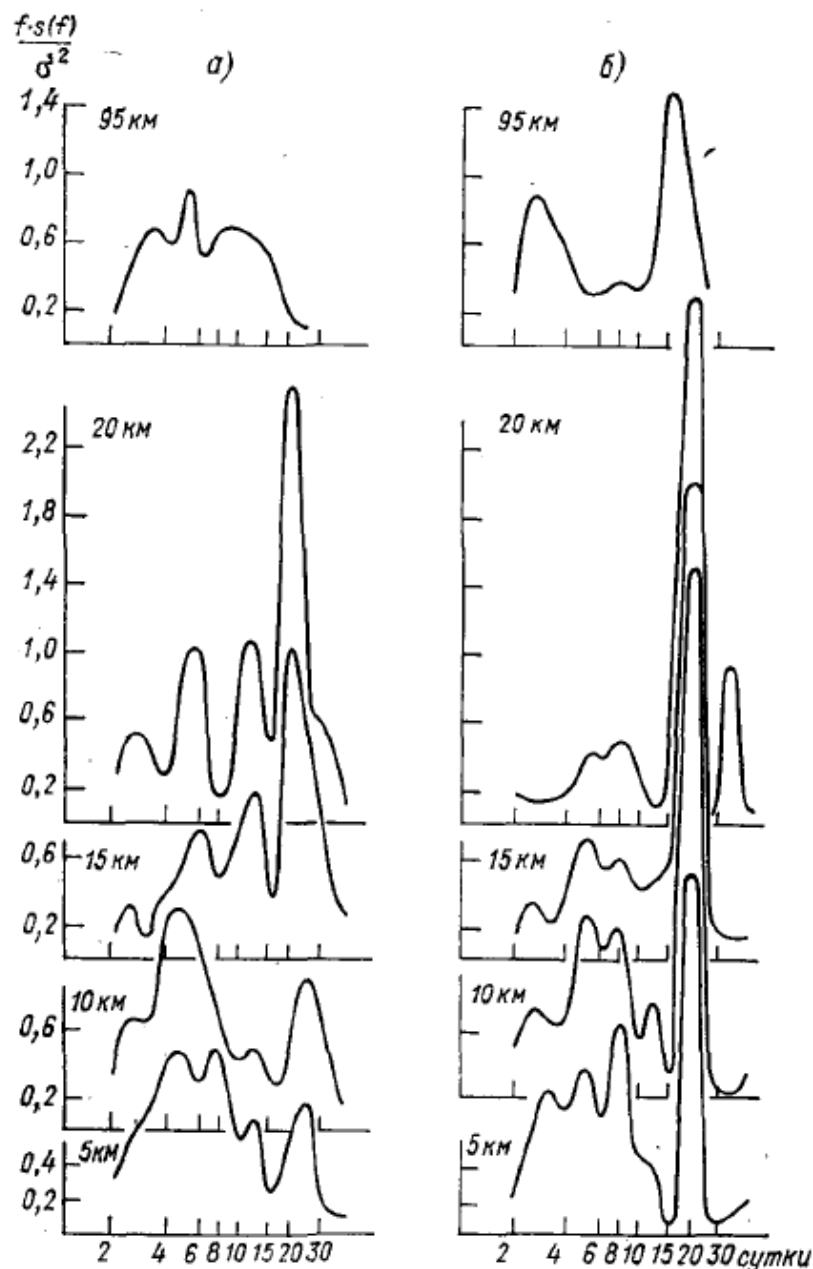


Рисунок 3.3 Результаты вычисления автоспектров по данным измерений в зимний период 1972-73 г. (4 месяца) в Кюлунгсборне — Коллме (метод D1, 95 км) и в Берлине (5—20 км).

а — зональная составляющая, б — меридиональная.

Рассмотрим спектры для летнего сезона 1973 г., вычисленные по данным для Обнинска и Долгопрудного (рисунок 3.2). Можно отметить значительное отличие этих спектров от спектров для зимнего сезона. Спектр зональной скорости для метеорной зоны сильно сглажен и не дает отчетливо выраженных изолированных максимумов, подобных максимумам в спектрах для стратосферы

и тропосферы. В летних спектрах зонального ветра для Долгопрудного нет четко выделенных периодов, общих для всех высот. В тропосфере главный максимум расположен там же, где и зимой (около 16 суток); в стратосфере он расширяется и смещается к периоду 21 сутки. Иная картина наблюдается в летних спектрах меридиональной составляющей скорости преобладающего ветра. В этом случае опять, как и в зимнее время, на всех высотных уровнях отчетливо выражен один и тот же главный максимум порядка 16 суток.

При переходе от зимы к лету в спектрах меридиональной составляющей преобладающего ветра происходит смещение максимумов в сторону меньших периодов для всех высот (от 21 к 16 суткам), но в целом эти спектры сохраняют главную характерную особенность — существование общих периодичностей на всех анализируемых высотных уровнях.

Наибольшую трансформацию при переходе от зимы к лету претерпевают спектры для метеорной зоны, особенно для зональной составляющей преобладающего ветра. Отмечается некоторое ослабление максимумов спектральной плотности зонального ветра для летнего периода. Этот эффект выражен очень сильно, и летний спектр имеет лишь слабые максимумы. В отличие от спектров зонального преобладающего ветра, в спектрах меридионального ветра, как зимой, так и летом четко выделяются три основных периода, причем максимумы для летнего сезона (16, 4, 2 суток) сдвинуты относительно зимних (21; 5; 2,5 суток) в сторону меньших периодов.

Таким образом, приведенные результаты спектрального анализа свидетельствуют о существенных различиях спектров меридиональной и зональной скорости преобладающего ветра для зимнего и летнего сезонов на различных уровнях тропосферы, стратосферы и метеорной зоны. [58]

3.2 Анализ данных ретроспективного анализа MERRAи данных, полученных с радарного комплексаМК-31

В последние годы появилась возможность изучать приливные колебания по данным ретроспективного анализа MERRA (Rienecker, 2011). Эти данные доступны, начиная с 1980 года, имеют временное разрешение 3 часа, т.е. позволяют анализировать суточные и полусуточные колебания атмосферных параметров. Данные глобальные, т.е. имеется возможность разделять планетарные волны и приливы на стоячие и распространяющиеся компоненты. Благодаря достаточной длительности (35 лет) есть возможность изучать как климатическую изменчивость, наблюдаемую в последние десятилетия, так и строить композиты для различных условий, например, для различных фаз квазидвухлетних колебаний (КДК), чтобы изучить влияние КДК на динамику внетропической стратосферы.

Прежде чем перейти к обсуждению поведения приливов и планетарных волн в стратосфере в 2016 году, необходимо определить время наступления событий внезапных стратосферных потеплений (ВСП) в этом году. На рисунке 3.4 представлено отклонение температуры от климатических значений в области северного полюса (нижняя панель рисунка 3.4) и распределение скорости зонального ветра с высотой (средняя панель рисунка 3.4). Исходя из этих данных, однозначно можно утверждать, что ВСП наблюдалось с 8 февраля 2016 года и продлилось примерно до 11 числа того же месяца. В эти дни повышение среднезональной температуры отмечалось до 70 К на высотах 35—40 км. Следует также отметить всплеск вторичного увеличения амплитуды планетарной волны с волновым числом 1 (верхняя панель рисунка 3.4) до наступления ВСП. Первичный всплеск наблюдается в первой декаде января. Подобная картина появляется очень часто в последние годы.

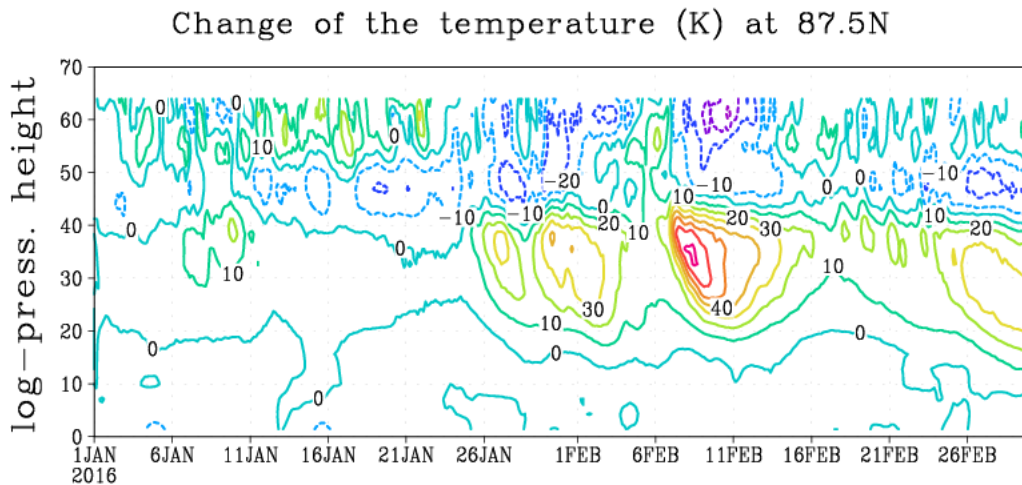
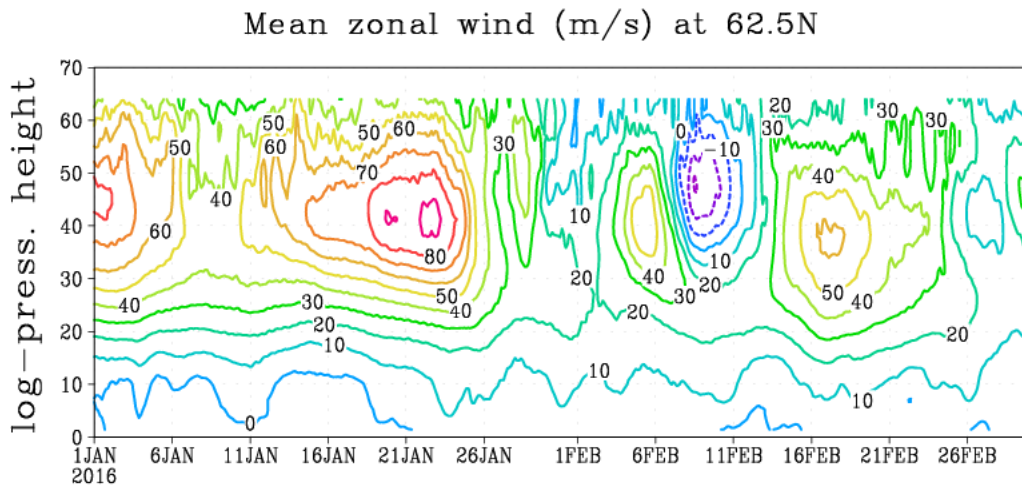
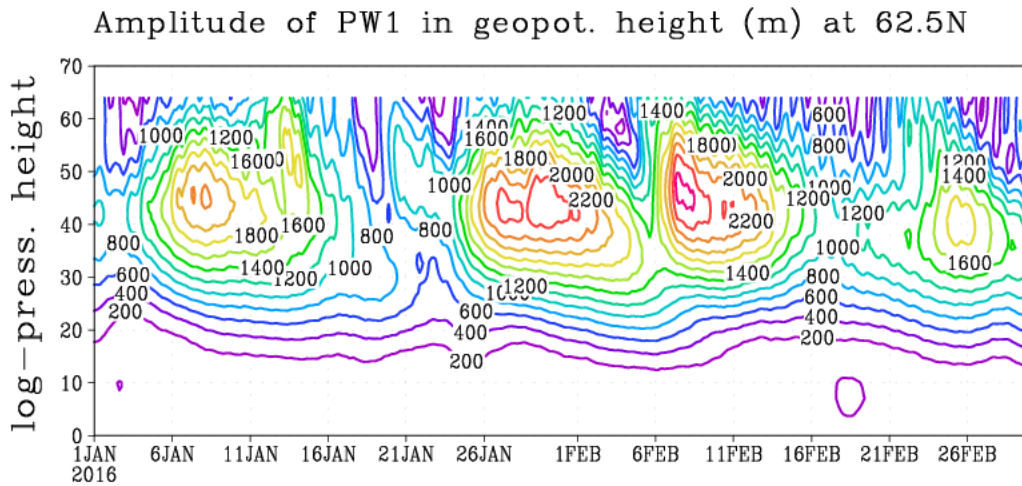
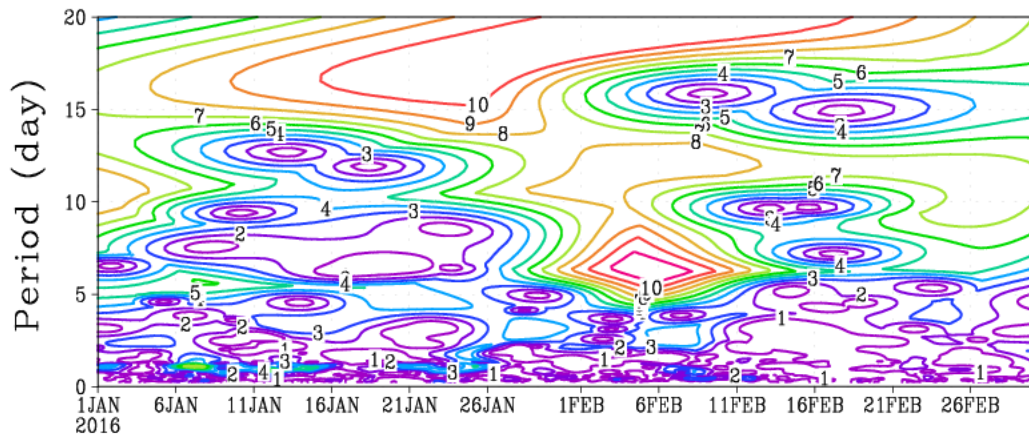


Рисунок 3.4 Высотно-временное сечение амплитуд зональной гармоники с волновым числом $m = 1$ (верхняя панель), среднего зонального ветра (средняя панель) и отклонения среднезональной температуры (нижняя панель) в поле геопотенциальной высоты на широте 62.5° с.ш. для амплитуды зональной гармоники и ветра, и 87.5° с.ш. для температуры соответственно. Январь-февраль 2016 г.

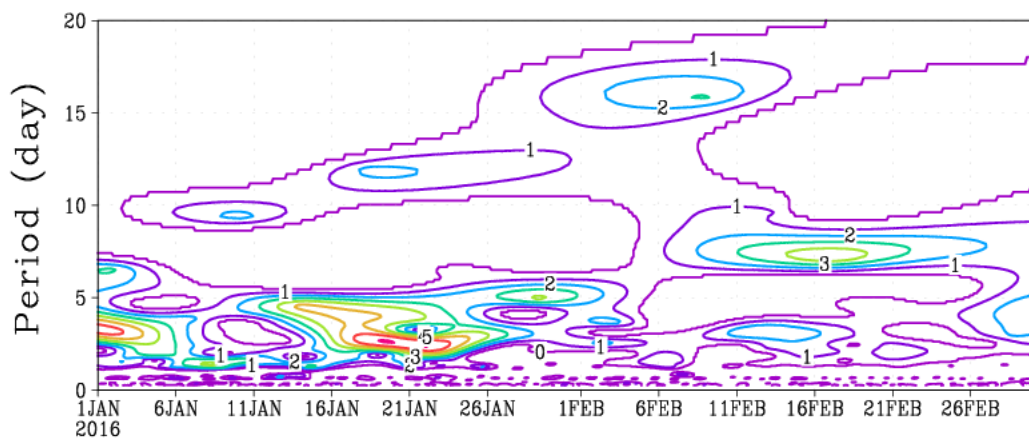
Для демонстрации возможности выделения приливных колебаний из данных MERRA на рисунке 3.5 представлены амплитуды стоячих волн (верхняя панель), волн, бегущих на восток (средняя панель) и волн, бегущих на запад (нижняя панель) с зональным волновым числом $m = 1$ в поле меридионального ветра на высоте 65 км и широте 65.7° с.ш. за январь-февраль 2016 г. Из рисунка видно присутствие, по крайней мере, суточного и полусуточного мигрирующих приливов, а также немигрирующего суточного прилива с $m = 2$.

На рисунке 3.5 следует отметить усиление колебаний амплитуды стационарной планетарной волны с волновым числом $m = 1$ (верхняя панель) с квазипериодом 5 — 7 дней во время развития событий ВСП. Здесь же присутствуют классический суточный прилив и неклассический полусуточный (нижняя панель). Для оценки поведения приливов во время ВСП были построены графики с акцентом только на вышеуказанные планетарные волны (см. рисунки 3.7 с $m=1$ и 3.8 с $m=2$). На рисунке 3.7 очевидно наблюдается разрушение мигрирующего прилива и, наоборот, максимальная амплитуда у немигрирующего во время развития событий ВСП. Аналогичная картина присутствует на нижней панели рисунка 3.8 — разрушение классического полусуточного прилива во время развития событий ВСП.

Ampl. of standing PW1 in merid. wind (m/s) at 65km, 67.5N



Ampl. of eastward PW1 in merid. wind (m/s) at 65km, 67.5N



Ampl. of westward PW1 in merid. wind (m/s) at 65km, 67.5N

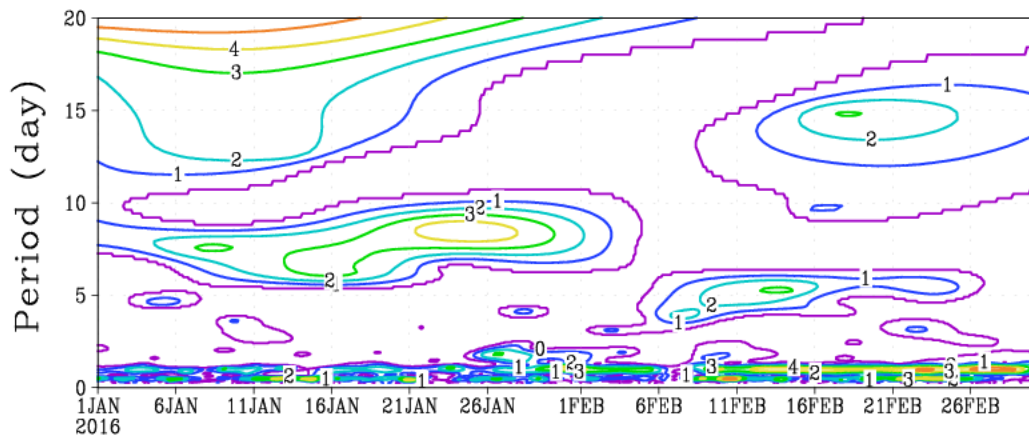


Рисунок 3.5 Амплитуды стоячих волн (верхняя панель), волн, бегущих на восток (средняя панель) и волн, бегущих на запад (нижняя панель) с зональным волновым числом $m = 1$ в поле меридионального ветра на высоте 65 км и широте 65.7° с.ш. Январь-февраль 2016 г.

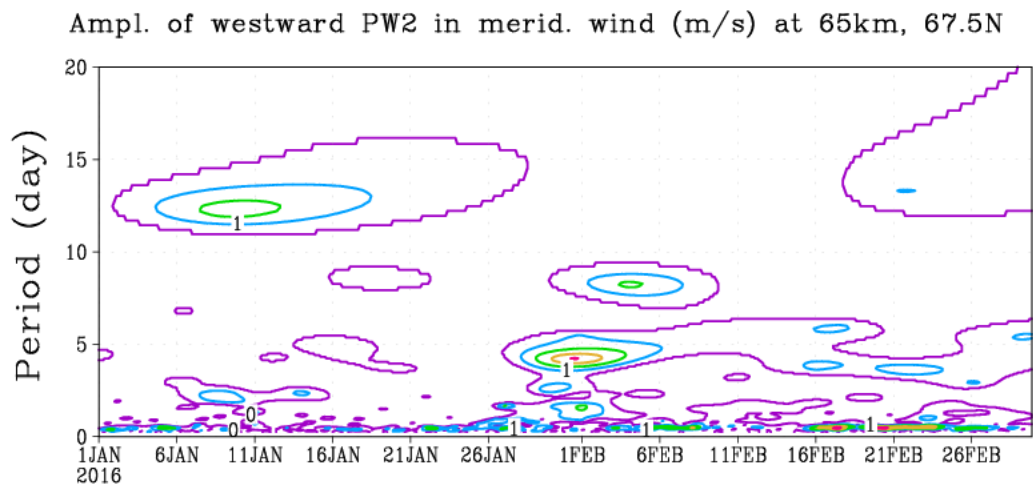
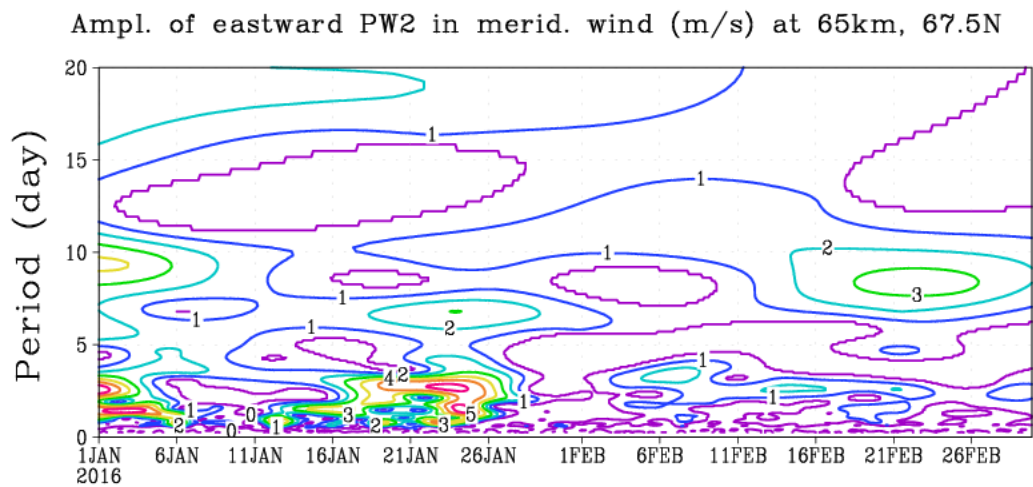
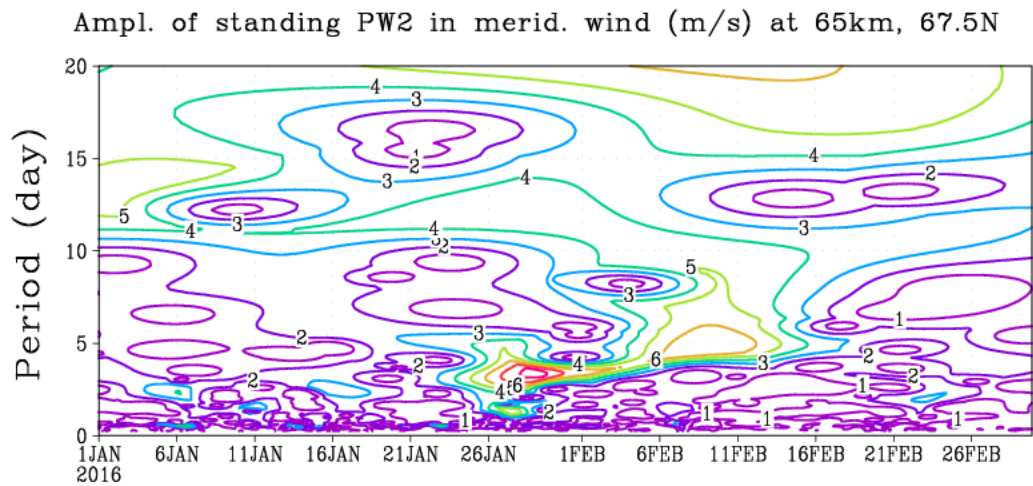
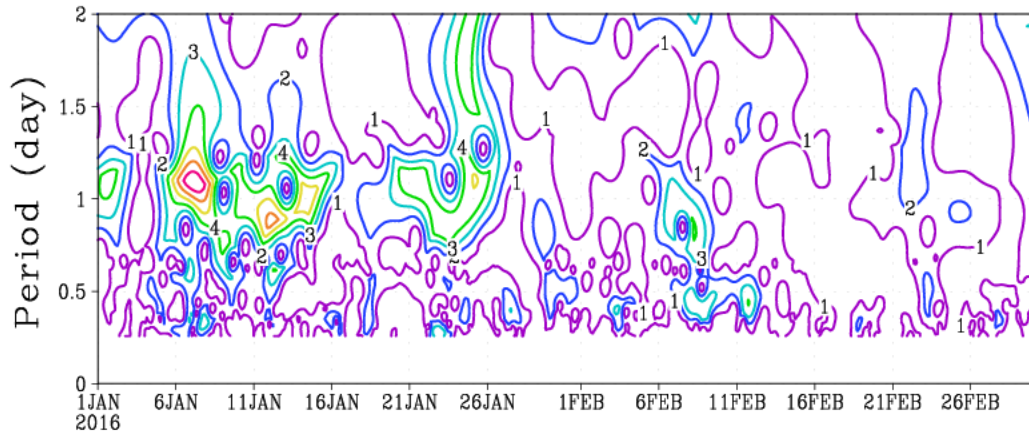
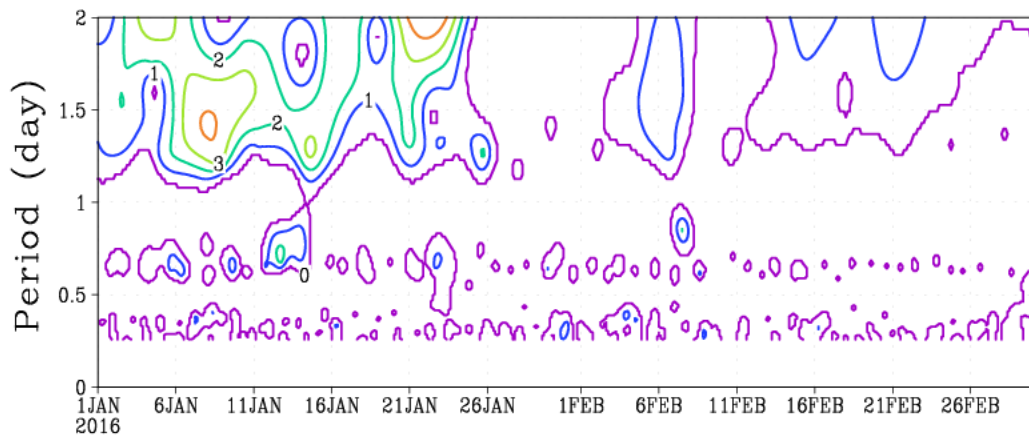


Рисунок 3.6 Амплитуды стоячих волн (верхняя панель), волн, бегущих на восток (средняя панель) и волн, бегущих на запад (нижняя панель) с зональным волновым числом $m = 2$ в поле меридионального ветра на высоте 65 км и широте 65.7° с.ш. Январь-февраль 2016 г.

Ampl. of standing PW1 in merid. wind (m/s) at 65km, 67.5N



Ampl. of eastward PW1 in merid. wind (m/s) at 65km, 67.5N



Ampl. of westward PW1 in merid. wind (m/s) at 65km, 67.5N

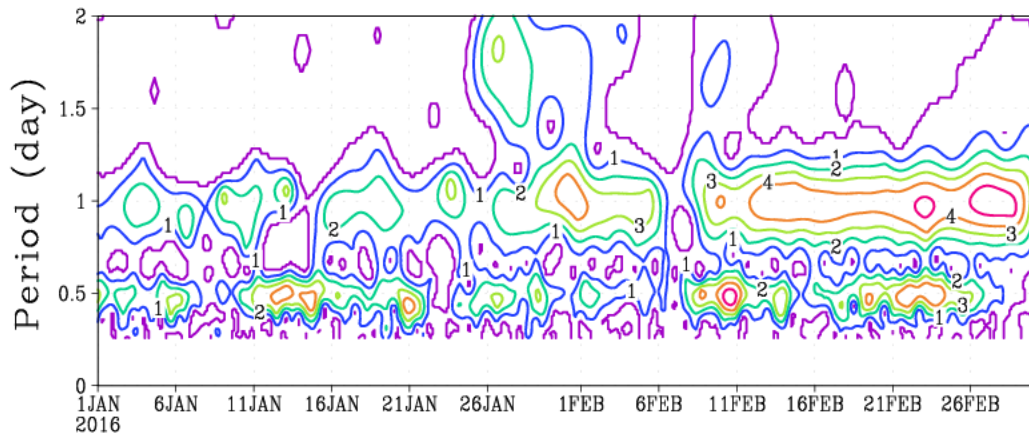
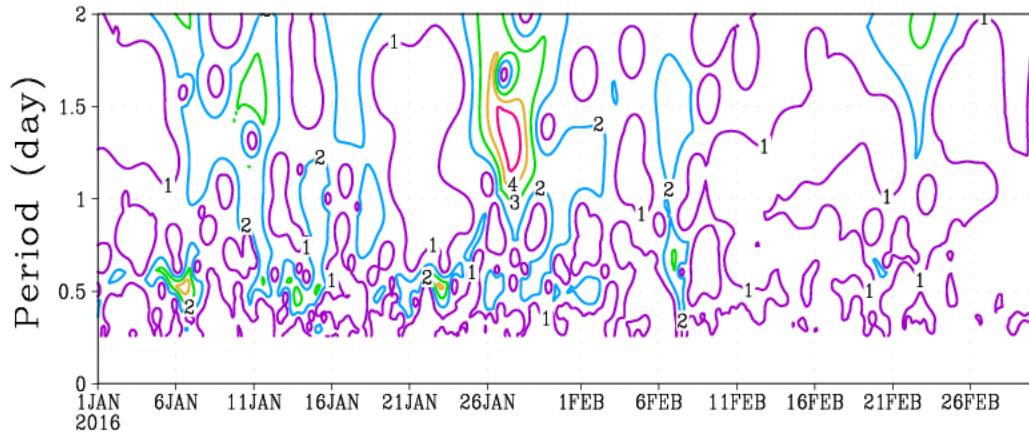


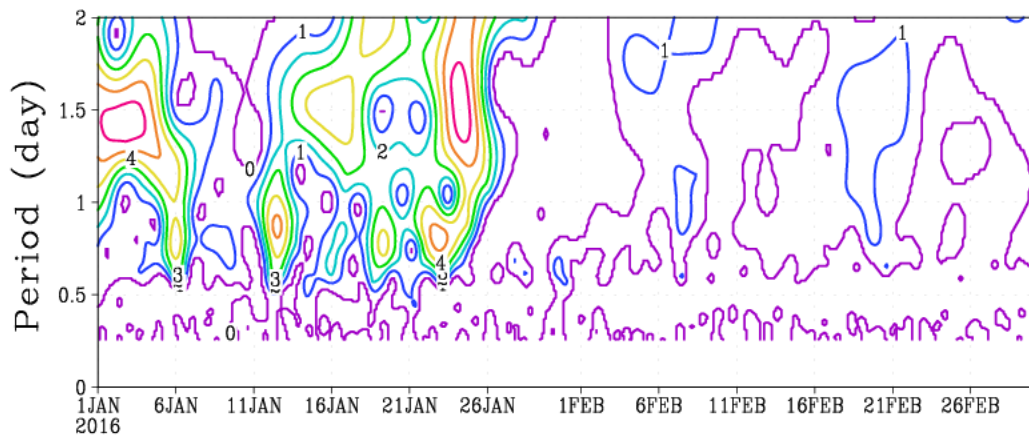
Рисунок 3.7 Амплитуды стоячих планетарных волн (верхняя панель), волн, бегущих на восток (средняя панель) и волн, бегущих на запад (нижняя панель) в поле меридионального ветра, с учётом, что спектры находятся в области периодов приливных колебаний, с зональным волновым числом $m = 1$ на высоте 65 км и широте 67.5° с.ш.

Январь-февраль 2016 г.

Ampl. of standing PW2 in merid. wind (m/s) at 65km, 67.5N



Ampl. of eastward PW2 in merid. wind (m/s) at 65km, 67.5N



Ampl. of westward PW2 in merid. wind (m/s) at 65km, 67.5N

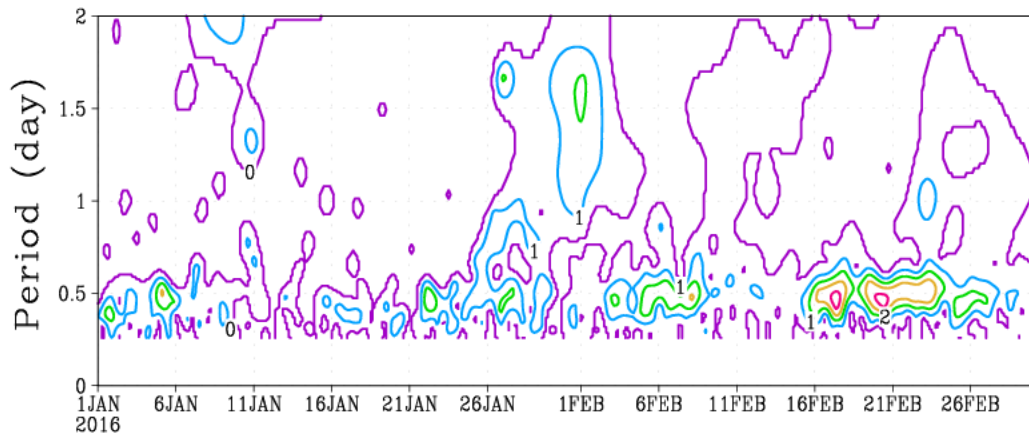


Рисунок 3.8 Амплитуды стоячих планетарных волн (верхняя панель), волн, бегущих на восток (средняя панель) и волн, бегущих на запад (нижняя панель) в поле меридионального ветра, с учётом, что спектры находятся в области периодов приливных колебаний, с зональным волновым числом $m = 2$ на высоте 65 км и широте 67.5° с.ш.

Январь-февраль 2016 г.

На рисунках 3.9 и 3.10 представлены наблюдения, полученные из радарных данных — амплитуды зонального и меридионального ветра соответственно в городе Кандалакша (67с.ш., 32.5 в.д.). Эти данные хорошо согласуются с данными MERRA (рисунки 3.7 и 3.8). Здесь опять же отмечается разрушение классического прилива во время развития событий ВСП.

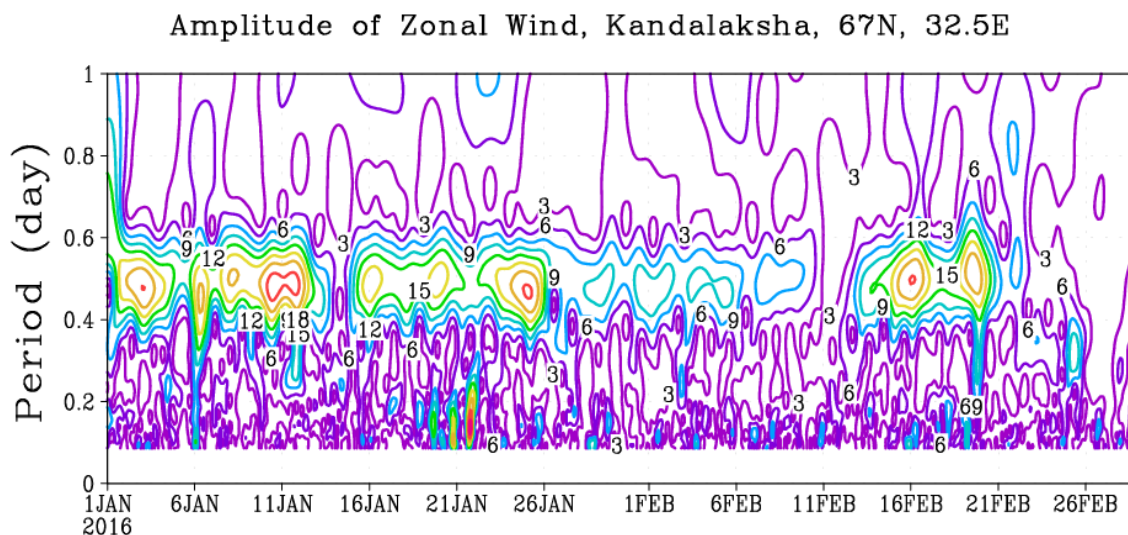


Рисунок 3.9 Вейвлет амплитуды в поле зонального ветра. Январь-февраль 2016 г. Кандалакша. 67° с.ш., 32.5° в.д.

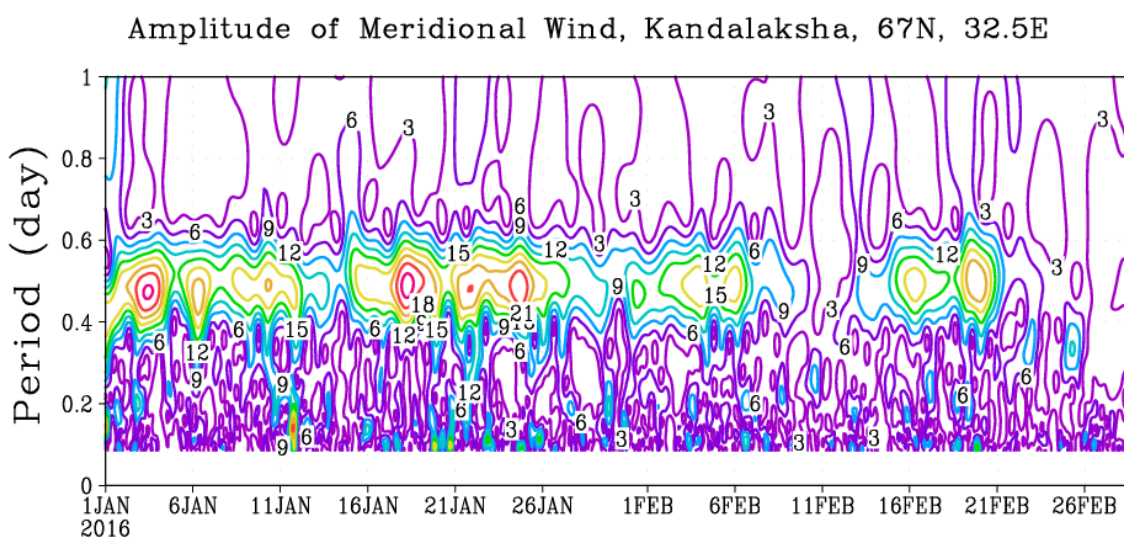


Рисунок 3.10 Вейвлет амплитуды в поле меридионального ветра. Январь-февраль 2016 г. Кандалакша. 67° с.ш., 32.5° в.д.

Очевидно, что для конечной оценки термодинамической обстановки в средней и верхней атмосфере недостаточно иметь данных из одной или даже нескольких точек (радарные данные). Для полноценного анализа необходимо привлекать такие данные, как, например, данные MERRA, чтобы получить «объемную» картину текущей ситуации или же межгодовой изменчивости поведения планетарных волн различного масштаба.

Заключение

Рассмотренные результаты свидетельствуют о том, что во многих случаях атмосфера Земли представляет собой единую динамическую систему вплоть до высот 100 км и процессы синоптического масштаба на различных высотных уровнях развиваются взаимосвязанно.

В настоящее время существуют две различные точки зрения на характер этих связей и на роль процессов в верхней атмосфере в формировании основных термобарических и циркуляционных образований в тропосфере и приземном слое.

Первая из них состоит в предположении, что вызванные воздействием солнечного корпускулярного и волнового излучения процессы в верхней атмосфере, энергетически незначительные по сравнению с процессами в нижележащих слоях, могут играть роль «спускового крючка» или «триггера» для тропосферных процессов, приводя в конечном счете к значительным изменениям погодных условий. Очевидно, такого рода изменения могут осуществляться главным образом в тех случаях, когда атмосфера находится в неустойчивом состоянии и ее потенциальная энергия близка к максимуму. Однако, как хорошо известно, изменения погодных условий происходят достаточно регулярно. Следовательно, принимая в качестве основного механизм «спускового крючка», необходимо предполагать, что атмосфера преимущественно находится в состоянии неустойчивого равновесия.

Вторая точка зрения заключается в отрицании какого-либо существенного влияния процессов в верхней атмосфере на процессы в тропосфере и в утверждении определяющего влияния энергетически более мощных по отношению к другим слоям процессов в тропосфере на развитие соответствующих процессов в верхней атмосфере. Обычно в этом случае

предполагается, что определенные крупномасштабные синоптические процессы генерируются в тропосфере и постепенно распространяются в стратосферу и в еще более высокие слои атмосферы, в то время как ряд процессов развивается на отдельных уровнях независимо и является специфическим для тех или иных слоев атмосферы.

О важности регулярного наблюдения за развитием стратосферных и стратомезосферных потеплений свидетельствует принятая в рамках Всемирной метеорологической организации система раннего оповещения о потеплениях и контроля за ними — «Stratwarm».

Результаты исследований связей динамических процессов на высотах 80 — 100 км с процессами в мезосфере, стратосфере и тропосфере позволяют сделать следующие выводы по обсуждаемому вопросу. Можно считать установленным, что в отдельные сезоны года крупномасштабные барические образования охватывают одновременно несколько высотных уровней, включая и область метеорной зоны. Важным результатом, полученным при анализе данных синхронных продолжительных наблюдений методами D1 и D2, следует считать факт практически одновременного начала возмущений динамического режима в метеорной зоне, связанных с процессами стратосферных потеплений и другими процессами синоптического масштаба, с соответствующими процессами на высотах стратосферы и тропосферы.

Это позволяет высказать предположение о том, что на многие крупномасштабные возмущения атмосфера реагирует как единое целое без существенного запоздания процессов на высоких уровнях по отношению к процессам в тропосфере. Поскольку в настоящее время нет физических оснований отрицать основополагающую роль процессов в тропосфере в изменении погодных условий с точки зрения энергетики, можно считать, что существуют некоторые механизмы сравнительно быстрого распространения энергии возмущений из тропосферы в вышележащие слои. Один из таких

механизмов может быть связан с распространяющимися внутренними гравитационными волнами.

Принимая во внимание гипотезу о возможной быстрой передаче энергии тропосферных возмущений до высот метеорной зоны посредством ВГВ или планетарных волн, приходим, таким образом, к выводу, что верхнюю атмосферу можно рассматривать как чувствительный и практически безынерционный индикатор состояния нижележащих слоев. Очевидно, что реакция верхней атмосферы на возмущения из нижележащих слоев зависит и от предыдущего состояния атмосферы, которое во многом определяется состоянием нижележащих слоев. Кроме того, физическое состояние верхней атмосферы зависит и от вариаций солнечной активности и целого ряда других процессов. Поэтому, конечно, анализ результирующих многофакторных изменений параметров верхней атмосферы представляет собой далеко не простую с методической точки зрения проблему, и поиски адекватных механизмов связей процессов на различных уровнях должны быть интенсифицированы. [58]

Перспектива изучения данной тематики только начинает раскрываться и, в целом, имеет широкие пределы. В настоящее время количество установленных радаров совсем невелико. В будущем же планируется создать замкнутую сеть связанных между собой радарных станций— с целью накопления, обработки и интерпретации новых данных.

В настоящее время уже запущен радар в Даймище, который замыкает сеть из радаров Кандалакша-Санкт-Петербург-Обнинск. Безусловно, это играет важную роль в получении данных об атмосфере Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Радарные данные позволяют увеличить количество материала о внутрисезонной, межсезонной и межгодовой изменчивости атмосферных приливов и планетарных волн. Сравнительный анализ измеряемых данных с

данными MERRAи UKMO позволит восстановить более полную картину о термодинамических процессах в средней и верхней атмосфере, которые следует учитывать при создании эмпирических моделей атмосферы и их корреляции.

Список литературы

1. Официальный сайт – «Метео Энциклопедия». [Электронный ресурс]. URL: <http://meteorologist.ru/atmosfernyie-prilivyi.html>
2. Официальный сайт – «Библиотека авторефератов и диссертаций по Физико-математическим и химическим наукам». [Электронный ресурс]. URL: <http://fizmathim.com/atmosfernyie-prilivy-i-vraschenie-zemli#ixzz45tKG0LBt>
3. В. Кузнецов. Лекция 12 «Структура земной атмосферы». По книгам Акасофу – Чепмена и Криволицкого – Куницына. Новосибирск, 2013. [Электронный ресурс]. URL: http://vvkuz.ru/books/lectures_1/12.pdf
4. Chapman, S. Atmospheric tides [Текст] / S. Chapman, R.S. Lindzen, D.Reidel // Norwell.Mass.–1970.–201 p.
5. Chang, J.L. A very Observations of the diurnal tide in the mesosphere and lower thermosphere over Christmas Island [Текст] / J.L Chang // Geophys.Res.–1997.–V. 102.–p. 1895-1907.
6. Hitchman, M.H. Diurnal Tide in the Equatorial Middle Atmosphere as Seen in LIMS Temperatures [Текст] / M.H. Hitchman, C.B. Leovy // J. Atmos. Sci.–1985.–V. 42.–p. 557-561.
7. Dudhia, A. Diurnal and semi-diurnal temperature variability of the middle atmosphere as observed by ISAMS [Текст] / A. Dudhia, S. E. Smith, A. R. Wood, F. W. Taylor // Geophys. Res. Lett.–1993.–V. 20.–p. 1251-1254.
8. Burrage, M.D Long-term variability in the solar diurnal tide observed by HRDI and simulated by the GSWM [Текст] / M.D. Burrage, M.E. Hagan, W.R. Skinner, D.L. Wu, P.B. Hays // Geophys. Res. Lett.–1995.–V. 22.–p. 2641-2644.
9. Khattatov, B.V. Diurnal migrating tide as seen by the high-resolution Doppler imager/UARS, 2, Monthly mean global zonal and vertical velocities,

pressure, temperature, and inferred dissipation [Текст] / B.V. Khattatov, M.A. Geller, V.A. Yudin, P.B. Hays // J. Geophys.–1997.–Res. 102(D4).–p. 4423-4435.

10. Wu, D.L. Equatorial diurnal variations observed in UARS MLS temperature during 1991-1994 and simulated by the CMAM [Текст] / D.L. Wu, C. McLandress, E.F. Fishbein, W.G. Read, J.W. Waters, L. Froidevaux // J. Geophys. Res.–1998.–V. 103.–p. 8909-8917.

11. Shepherd, M.G. Planetary scale and tidal perturbations in mesospheric temperatures observed by WINDII [Текст] / M.G. Shepherd, W.E. Ward, B. Prawirosoehardjo, R.G. Roble, S.P. Zhang, D.Y. Wang // Earth, Planets and Space.–1999.–№ 51(7-8).–p. 593-610.

12. Ward, W.E. A simple model of diurnal variations in the mesosphere oxygen nightglow [Текст] / W.E. Ward // Geophys. Res. Lett.–1999.–V. 26.–p. 3565-3568.

13. Oberheide, J. Modeling the diurnal tide for the Cryogenic Infrared Spectrometers and Telescopes for the Atmosphere (CRISTA) 1 time period [Текст] / J. Oberheide, M.E. Hagan, W.E. Ward, M. Riese, D. Offermann // J. Geophys. Res.–2000.–V. 105(A11).–p. 24917-24929.

14. Zhang, S.P. Variations of the mean winds and diurnal tides in the mesosphere and lower thermosphere observed by WINDII from 1992 to 1996 [Текст] / S.P. Zhang, G.G. Shepherd // Geophys. Res. Lett.–2005.–V. 32(14).–L14111.

15. Forbes, J.M. Theoretical studies of atmospheric tides [Текст] / J.M. Forbes, H.B. Garrett // Rev. Geophys.–1979.–V. 17.–p. 1951-1981.

16. Kato, S. Dynamics of the Upper Atmosphere. Cent. for Acad. [Текст] / S. Kato // Publ.–Tokyo.–1980.–p. 783-783.

17. Forbes, J. M. Atmospheric tides, 1, Model description and results for the solar diurnal component [Текст] / J. M. Forbes // J. Geophys. Res.–1982.–V. 87.–p. 5222-5240.

18. Forbes, J. M. Middle atmosphere tides [Текст] / J. M. Forbes // J. Atmos. Terr. Phys.–1984.–V. 46.–p. 1049-1067.

19. Vial, F. Tides in the middle atmosphere [Текст] / F. Vial // J. Atmos. Terr. Phys.–1989.–V. 51.–p. 3-17.
20. Vial, F. Recent progress in tidal modeling [Текст] / F. Vial, J.M. Forbes // J. Atmos. Terr. Phys.–1989.–V. 51.–p. 663-671.
21. Hagan, M.E On modeling migrating solar tides [Текст] / M.E Hagan, F. Vial, J.M. Forbes // Geophys. Res. Lett.–1995a.–V. 22.–p. 893-896.
22. Hagan, M.E. An updated model of migrating tides in the middle atmosphere: Initial results and measurement comparisons. Proceedings of the Workshop on Wind Observations in the Middle Atmosphere [Текст] / M.E Hagan, F. Vial, J.M. Forbes // CNES HQ, Paris France, 1995b.
23. Akmaev, R.A. Simulation of tides with a spectral mesosphere/lower thermosphere model [Текст] / R.A. Akmaev, J.M. Forbes, M.E Hagan // Geophys. Res. Lett.–1996.–V. 23.–p. 2173-2176.
24. McLandress, C. Seasonal variability of the diurnal tide: Results from the Canadian middle atmosphere circulation model [Текст] / C. McLandress // J. Geophys. Res.–1997.–V. 102.–p. 29747-29764.
25. Hagan, M. E. Modeling the diurnal tidal variability with the National Center for Atmospheric Research thermosphere-ionosphere-mesosphere-electrodynamics general circulation model [Текст] / M.E Hagan, R.G. Roble // J. Geophys. Res.–2001.–V. 106.–p. 24869-24882.
26. Lindzen, R.S. Atmospheric tides. [Текст] / R.S. Lindzen // Ann. Rev. Earth Planet. Sci.–1979.–V. 7.–p. 199-225.
27. Manson, A. Seasonal variations of the semi-diurnal and diurnal tides in the MLT: multi-year MF radar observations from 2 to 70 N, and the GSWM tidal model [Текст] / A. Manson // Ann. Geophys.–1999.–V. 61(11).–p. 809-828.
28. Hagan, M. E. Modeling the diurnal tidal variability with the National Center for Atmospheric Research thermosphere-ionosphere-mesosphere-electrodynamics general circulation model [Текст] / M.E Hagan, R.G. Roble // J. Geophys. Res.–2001.–V. 106.–p. 24869-24882.

29. Lindzen, R.S. Atmospheric tides. [Текст] / R.S. Lindzen // Ann. Rev. Earth Planet. Sci.–1979.–V. 7.–p. 199-225.
30. Teitelbaum, H. On tidal variability by nonlinear interaction with planetary waves [Текст] / H. Teitelbaum, F. Vial // J. Geophys. Res.–1991.–V. 96.–p. 14169-14178.
31. Forbes, J.M. Tidal and planetary waves. The Upper Mesosphere and Lower Thermosphere: A Review of Experiment and Theory [Текст] / J.M. Forbes // Geophysical Monogr. Ser. V. 87. Edited by R.M. Johnson and T.L. Killeen, American Geophysical Union AGU.–Washington.–1995.–p. 67-87.
32. Forbes, J. M. First results from the meteor radar at South Pole: a large 12-hour oscillation with zonal wavenumber one [Текст] / J.M. Forbes, N.A. Makarov, Y.I. Portnyagin // Geophys. Res. Lett.–1995.–V. 22.–p. 3247-3250.
33. Lieberman, R. S. Variability of diurnal tides and planetary waves during November 1978 - May 1979 [Текст] / R.S. Lieberman, J. Oberheide, M.E. Hagan, E.E. Remsberg, L.L. Gordley // J. Atmos. Sol. Terr. Phys.–2004.–V. 66.–p. 517-528.
34. Angelats, M. Nonlinear interaction in the upper atmosphere: The $s=1$ and $s=3$ nonmigrating semidiurnal tides [Текст] / M. Angelats, J.M. Forbes // J. Geophys. Res.–2002.–V. 107.–No. A8. doi10.1029/2001JA900179.
35. Forbes, J.M. Upper atmosphere tidal oscillations due to latent heat release in the tropical troposphere [Текст] / J.M. Forbes, M.E. Hagan, X. Zhang, K. Hamilton // Ann. Geophys.–1997.–V. 15.–p. 1165-1175.
36. Hagan, M. E. Migrating and nonmigrating diurnal tides in the upper atmosphere excited by tropospheric latent heat release [Текст] / M.E. Hagan, J.M. Forbes // J. Geophys. Res.–2002.–V. 107 (D24). doi: 10.1029/2001JD001236.
37. Hagan, M. E. Migrating and nonmigrating semi-diurnal tides in the upper atmosphere excited by tropospheric latent heat release [Текст] / M.E. Hagan, J.M. Forbes // J. Geophys. Res.–2003.–V. 108. doi: 10.1029/2002JA009466.
38. Kato, S. Thermal excitation of non-migrating tides [Текст] / S. Kato, T. Tsuda, F. Wantanabe // J. Atmos. Terr. Phys.–1982.–V. 44.–p. 131-146.

39. Tsuda, T. Diurnal non-migrating tides excited by a differential heating due to land-sea distribution [Текст] / T. Tsuda, S. Kato // J. of Meteorol. Soc. of Japan.–1989.–V. 67.–p. 43-54.
40. McLandress, C. Tidal/gravity wave interactions and their influence on the large scale dynamics in the middle atmosphere [Текст] / C. McLandress, W.E. Ward // J. Geophys.–1994.–V. 99.–p. 8139-8155.
41. Forbes, J.M. Diurnal propagating tides in the low latitude middle atmosphere [Текст] / J.M. Forbes, G.V. Groves // J. Atmos. Terr. Phys.–1987.–V. 49.–p. 153–164.
42. Yagai, I. Non-migrating thermal tides detected in data analysis and a general circulation model [Текст] / I. Yagai // J. Geophys. Res.–1989.–V. 94.–p. 6341– 6356.
43. Oberheide, J. Observations of the migrating and nonmigrating diurnal tides in the equatorial lower thermosphere [Текст] / J. Oberheide, O.A. Gusev // Geophys. Res. Lett.–2002.–V. 29. doi: 10.1029/2002-GL016213.
44. Hagan, M.E. GSWM estimates of nonmigrating tidal effects [Текст] / M.E. Hagan, J.L. Chang, S.K. Avery // J. Geophys. Res.–1997.–V. 102(D14).–p. 16,439- 16,452.
45. Lieberman, R.S. Climatology and interannual variability of diurnal water vapor heating [Текст] / R.S. Lieberman , D.A. Ortland, E.S. Yarosh // J. Geophys. Res.–2003.–V. 108(D3).–p. 4123.
46. Циркуляция атмосферы // Науки о Земле [Электронный ресурс].– Единая коллекция цифровых образовательных ресурсов–М.,2006.Режим доступа:http://window.edu.ru/resource/836/20836/files/9703_075.pdf
47. Tsuda, T. Coordinated radar observations of atmospheric diurnal tides in equatorial regions [Текст] / T. Tsuda // Earth Planets Space.–1999.–V. 51.–p. 579-592.

48. Pogoreltsev A.I., Kanukhina A.Yu., Suvorova E.V., Savenkova E.N. Variability of planetary waves as a signature of possible climatic changes // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 71. doi:10.1016/j.jastp.2009.05.011. 2009
49. Холтон Дж. Динамическая метеорология стратосферы и мезосферы.- JL: Гидрометеоиздат, 1979.– 224 с.
50. Charney, J.G., and P.G.Drazin, 1961: Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the lower into the upper atmosphere. J. Geophys. Res., 66, 83-109.
51. Andrews, D.G., J.R. Holton, and C.B. Leovy, 1987: Middle Atmosphere Dynamics. Academic Press Inc., 489 pp.
52. Lin, B., 1982 : The behavior of winter stationary planetary waves forced by topography and diabatic heating. J. Atmos. Sci., 39, 1206-1226.
53. Hu, Y., and K.K. Tung, 2002: Tropospheric and equatorial influences on planetary-wave amplitude in the stratosphere. Geophysical Research Letter, 29, 6-1 - 6-4.
54. Chen., P., and W.A.Robinson, 1992: Propagation of planetary waves between the troposphere and stratosphere. J. Atmos. Sci., 49, 2533-2345
55. Официальный сайт научно-информационного журнала «Биофайл». [Электронный ресурс]. URL:<http://refdb.ru/look/1320037-p2.html>
56. Официальный сайт сетевого сообщества—социальной сети «LiveJournal». [Электронный ресурс]. URL: <http://moralg.livejournal.com/210356.html>
57. Официальный сайт «Словаря морских терминов». [Электронный ресурс]. URL:<http://www.marineterms.ru/term/ПЛАНЕТАРНЫЕ20ВОЛНЫ>
58. Государственный комитет СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды. Институт экспериментальной метеорологии. I Академия Наук ГДР. Обсерватория ионосферных исследований Центрального института солнечно-земной физики им. Г. Герца Геофизическая обсерватория Лейпцигского университета им. К. Маркса. Измерение ветра на высотах 90—

100 км наземными методами. Под редакцией канд. физ.-мат. Наук Ю. И. Портнягина, проф. К. Шпренгера. Ленинград. Гидрометеоздат. 1978.

59. Официальный сайт – «Научная библиотека диссертаций и авторефератов». [Электронный ресурс]. URL: disserCat <http://www.dissercat.com/content/vzaimodeistvie-voln-globalnogo-masshtaba-v-srednei-atmosfere-i-ikh-vliyanie-na-srednezonalnu#ixzz45tBw5Y8N>

60. Комплекс Радиолокационный МК-31. Руководство по эксплуатации МАЕК.416311.007РЭ. Разработали: Б.И. Петров, И.А. Борисенко Проверил: Н.А.Макаров. Зав. лаб.№3 ИЭМ: А.А. Юдаков Обнинск – 20101.