

На правах рукописи

РЯБЧЕНКО Евгений Юрьевич

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ
ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СПОРАДИЧЕСКОМ СЛОЕ E

Специальность 25.00.29 — физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань - 2006

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
доцент Шерстюков Олег Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Минуллин Ренат Гизатуллович

кандидат физико-математических наук,
доцент Хуторова Ольга Германовна

Ведущая организация: Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн Российской
академии наук

Защита диссертации состоится « » марта 2006 г. в часов в ауд. 210
физического факультета на заседании диссертационного совета
Д212.081.18 в Казанском государственном университете по адресу:
420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского
государственного университета.

Автореферат разослан « » января 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.081.18,
д.ф.-м.н., профессор

Карпов А.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Ионосфера является частью земной атмосферы и ее целостное изучение невозможно без рассмотрения метеорологических процессов, происходящих на высотах тропо-, страто-, мезо- и термосферы. Влияние процессов в нижележащей атмосфере на динамику ионосферы было обнаружено еще в 30-е годы прошлого столетия. Особенно сильное метеорологическое влияние испытывает ионосферный спорадический слой E . В отличие от регулярных слоев, образование Es -слоя с повышенной относительно E -слоя электронной концентрацией не относится к постоянным и предсказуемым событиям, объясняемым только вариациями гео- и гелиопараметров.

В 1960-х гг. была предложена метеорологическая концепция образования Es -слоя — *теории ветрового сдвига*, которая до сих пор остается доминирующей для среднеширотной ионосферы. В свою очередь, на возникновение ветрового сдвига значительное влияние оказывают процессы в нижележащей атмосфере, вызывая суточные, сезонные и межгодовые вариации параметров Es -слоя. В настоящее время не построена физическая модель, адекватно описывающая пространственно-временную структуру Es -слоя с учетом глобального метеорологического влияния, обусловленного, в частности, планетарными волнами и атмосферной циркуляцией. Поэтому важным представляется изучение метеорологического влияния на образование Es -слоя в планетарном масштабе для объяснения закономерностей в вариациях параметров Es -слоя от масштабов планетарных волн (2–30 суток) до межгодовых.

Изучение динамики Es -слоя имеет важное значение для физики верхней атмосферы, а также представляет собой интерес для практической КВ и УКВ радиосвязи. Повышение электронной концентрации Es -слоев летом может приводить либо к значительному усилению радиосигнала в точке приема из-за увеличения коэффициента отражения, обеспечивая радиосвязь на расстояниях до 2200 км, либо к полному исчезновению сигнала из-за экранирования F -области нижележащим слоем Es .

Для изучения глобальных метеорологических эффектов в Es -слое требуется целостный анализ больших массивов данных, содержащих информацию по измерениям параметров Es -слоя, охватывающим максимально возможные пространственные и временные масштабы. Однако, даже в новейших работах по Es -слою рассматриваются, как правило, только короткие интервалы времени и отдельно взятые области. Накопленная информация по ионосферным измерениям на планете за последние 50 лет дает возможность провести целостный анализ, который позволит, во-первых, получить статистически значимые результаты, во-вторых, рассмотреть пространственно-временные закономерности метеорологического влияния на динамику Es -слоя в глобальном масштабе.

Целью работы является установление пространственно-временных закономерностей волновых процессов с периодами 2–32 суток в частотных параметрах E_s -слоя северного полушария и их связи с квазидвухлетней цикличностью экваториальной атмосферной циркуляции.

Поставленная цель потребовала решения следующих задач:

— разработать метод частотно-временного анализа и определения волновых свойств динамических процессов в E_s -слое; создать интерполяционную модель пространственно-временных колебаний геофизических параметров;

— исследовать морфологические закономерности в 2–32-суточных колебаниях частотных параметров E_s -слоя и построить среднесезонные спектры колебаний;

— определить характерные направления движения волновых возмущений в E_s -слое в северном полушарии на основе пространственно-временной интерполяции амплитуд 2–32-суточных колебаний предельной частоты E_s -слоя;

— исследовать связь вариаций амплитуд 2–32-суточных колебаний частотных параметров E_s -слоя, а также зональной и меридиональной составляющих направления движения волновых возмущений E_s -слоя с квазидвухлетним циклом атмосферной циркуляции.

Научная новизна заключается в следующем:

— разработан метод исследования пространственно-временных колебаний геофизических параметров с возможностью определения направлений движения волновых возмущений заданного временного периода;

— установлен характер распределений интенсивностей 2–32-суточных колебаний частотных параметров E_s -слоя в зависимости от сезона и выделены периоды доминирующих колебаний на основе вейвлет-анализа 20–50-летних экспериментальных данных по измерениям E_s -слоя в северном полушарии;

— найдено глобальное пространственно-временное распределение амплитуды квази 16-суточного колебания предельной частоты E_s -слоя в северном полушарии за 20–50-летний период и выделены характерные направления движения квази 16-суточных волновых возмущений E_s -слоя по сезонам;

— найдена связь вариаций среднегодовых амплитуд 4–24-суточных колебаний предельной частоты E_s -слоя, а также зональной и меридиональной составляющих направления движения 16-суточной волны в поле колебаний f_oE_s с квазидвухлетней цикличностью атмосферной циркуляции.

Практическая ценность работы. Разработана модель пространственно-временных колебаний, дающая универсальный подход к изучению различных геофизических волновых процессов. Обнаруженные частотно-временные закономерности в параметрах E_s -слоя имеют

большое значение для долгосрочного прогноза частотных параметров E_s -слоя, влияющих на распространение декаметровых радиоволн. Найденные закономерности пространственно-временных колебаний E_s -слоя представляются важными для развития физических моделей E_s -слоя, учитывающих влияние метеорологических параметров нижележащей атмосферы.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработанный метод исследования волновых закономерностей в геофизических параметрах на основе интерполяционной модели пространственно-временных колебаний.

2. Обнаруженные сезонные и межгодовые закономерности в частотно-временных спектрах 2–32-суточных колебаний частотных параметров E_s -слоя с преобладанием периодичностей 4–6, 14–16 и 22–28 суток.

3. Установленные пространственно-временные закономерности распределения амплитуды квази 16-суточного колебания предельной частоты E_s -слоя (f_oE_s) и характерные зональные направления движения квази 16-суточных волновых возмущений E_s -слоя в северном полушарии.

4. Обнаруженная связь среднегодовых значений f_oE_s , амплитуд 4–24-суточных колебаний f_oE_s , а также зональной и меридиональной составляющих направления движения 16-суточной волны в поле f_oE_s с квазидвухлетней циклическостью атмосферной циркуляции.

Достоверность полученных результатов подтверждена статистической надежностью многолетних наблюдений на более чем 100 ионосферных станциях северного полушария. Основные результаты исследования получены на основе 20–50-летних данных по измерениям параметров E_s -слоя. Вычисляемые коэффициенты корреляции подвергались статистической проверке на значимость. Достоверность результатов, полученных с помощью разработанного алгоритма анализа направлений движения, подтверждена испытаниями алгоритма на модельных примерах волновых движений.

Личный вклад автора: автором адаптирована методика вейвлет-анализа на основе функции Морле для исследования спектральных вариаций временных рядов в терминах Фурье-преобразования. С помощью данной методики установлен характер распределений интенсивностей 2–32-суточных колебаний частотных параметров E_s -слоя по сезонам и выделены периоды доминирующих колебаний. Автором разработана интерполяционная модель пространственно-временных колебаний геофизических параметров для исследования волновых процессов с возможностью определения направлений движения волновых возмущений. При этом были предложены оригинальный метод интерполяции функций в сферических координатах и алгоритм определения направлений движения в поле интерполированных значений исследуемого параметра. На основе интерполяции найдено глобальное пространственно-временное распределение

квази 16-суточных колебаний предельной частоты E_s -слоя в северном полушарии. Автором определены характерные направления движения квази 16-суточных волновых возмущений E_s -слоя и установлена их связь с квазидвухлетним циклом атмосферной циркуляции. Все вышеописанные методы реализованы в рамках единого специализированного пакета программного обеспечения, с помощью которого проведена комплексная обработка большого объема экспериментальных данных за 20–50-летний период.

Апробация работы и публикации. Результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на XX, XXI Всероссийских конференциях по распространению радиоволн (Н. Новгород, 2002 г., Йошкар-Ола, 2005 г.), на Всероссийской научной конференции «Фундаментальные исследования взаимодействия суши, океана и атмосферы» (Москва, 2002 г.), на международных конференциях: IUGG-2003 (Саппоро, Япония), COSPAR-2004 (Париж, Франция), Workshop on Computational Physics (С.-Петербург, 2003), на V, VI Всероссийских молодежных научных школах «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия» (Казань, 2001, 2002 гг.), на IV Республиканской научной конференции молодых ученых и специалистов РТ (Казань, 2001), на II Итоговой конференции Республиканского конкурса научных работ им. Н.И. Лобачевского (Казань, 2002), а также на научных семинарах и конференциях Казанского государственного университета (2001–2005 гг.).

Исследования по теме диссертации в 2002–2005 гг. поддержаны грантами РФФИ №№ 01-05-65251-а (исполнитель), 02-05-06162-мас, 03-05-06376-мас, 05-05-64651-а (исполнитель), грантом Федерального агентства по образованию № А04-2.13-765 (2004 г.), грантом для государственной поддержки молодых ученых Республики Татарстан № 07-3 (Г) (2005 г.). Результаты диссертации использовались при выполнении госбюджетной темы Казанского государственного университета «Исследование волновой структуры циркуляции среднеширотной верхней мезосферы - нижней термосферы» № гос. рег. 01.200.1 11805, 2001–2005 гг.

По результатам диссертации автором опубликовано 18 работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. В ней содержится 146 страниц печатного текста, приводится 37 рисунков и 16 таблиц. Список литературы содержит 132 работы.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, ее цель, научная новизна и практическая значимость; формулируются положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются физические параметры, характеристики и механизмы формирования E_s -слоя, а также характерные пространственно-временные вариации его параметров в приэкваториальных, средних и высоких широтах. Исходя из *теории ветрового сдвига*, наиболее разработанной и подтвержденной экспериментально, можно ожидать значительное метеорологическое влияние на E_s -слой со стороны нижележащей атмосферы. Вариации параметров E_s -слоя с периодами от 2 до 20–30 суток могут быть вызваны *планетарными волнами* — возмущениями метеорологических параметров, периодическими по долготе и во времени.

Обзор исследований показывает, что в вариациях метеопараметров на высотах тропостратомезосферы наблюдаются характерные периоды колебаний 2–30 суток, при этом одним из доминирующих периодов можно считать 16 суток. Волны с периодами 5, 10 и 16 суток соответствуют модам свободных волн Россби для атмосферы и являются типичными периодами планетарных волн (ПВ). В теоретических работах указывается, что существуют механизмы распространения ПВ из нижней атмосферы до высот верхней мезосферы - нижней термосферы (MLT-области). В зимнее время проникновению ПВ на эти высоты благоприятствуют западные ветры в стратосфере. В летнее время появление ПВ на высотах MLT-области может быть обусловлено проникновением ПВ через экватор из зимней мезосферы в летнюю или воздействием гравитационных волн, промодулированных планетарными волнами с характерными периодами 2–30 суток. Обзор исследований также показывает, что влияние возмущений этих периодов обнаружено в вариациях ионосферных параметров, в частности, в частотных параметрах E_s -слоя, что подтверждает возможность влияния ПВ на динамику E -области. Однако, законченная теория воздействия ПВ на волновые процессы E_s -слоя пока не создана.

На образование E_s -слоя вплоть до полярных широт способны значительно повлиять метеорологические процессы планетарного масштаба, такие как *квазидвухлетний цикл (КДЦ) атмосферной циркуляции*, фаза которого (восточная или западная) определяется направлением преобладающего зонального ветра экваториальной стратосферы. Влияние КДЦ атмосферной циркуляции может сказываться как на общей интенсивности E_s -слоя, так и на амплитудах колебаний его параметров с периодами ПВ, при этом влияние может проявляться на всех широтах. На сегодня данный вопрос остается практически неизученным.

Таким образом, остается актуальной задача подробного исследования метеорологических эффектов в динамике E_s -слоя, обусловленных планетарными волнами, а также процессами, связанными с общей атмосферной циркуляцией, в частности, с квазидвухлетней цикличностью зонального ветра экваториальной стратосферы.

Вторая глава посвящена методам обработки и анализа экспериментальных данных, на основе которых проводится исследование пространственно-временных закономерностей волновых процессов в параметрах Es -слоя северного полушария.

Основным методом спектрального анализа временных рядов в настоящем исследовании является *интегральное (непрерывное) вейвлет-преобразование* (ИВП) на основе базисной функции (вейвлета) Морле. Данный метод позволяет получать частотно-временные спектры рядов, т. е. информацию об изменении спектрального состава во времени и является дальнейшим развитием метода анализа на основе оконного Фурье-преобразования (ОФП). Выбор вейвлета Морле обусловлен следующим: 1) вейвлет имеет хорошую частотно-временную локализованность; 2) вейвлет является комплексной функцией и соответственно имеет нулевые коэффициенты Фурье при отрицательных частотах, что важно для анализа временных рядов; 3) вейвлет представляет собой локализованное во времени почти гармоническое колебание с оконной функцией Гаусса, что соответствует задаче исследования гармонических волн в атмосфере в линейном приближении. Рассматриваемое ИВП на основе вейвлета Морле имеет вид:

$$(W_\psi f(t))(b, a) = \gamma \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-b)^2}{2a^2}\right) \exp\left(-i\Omega \frac{t-b}{a}\right) dt,$$

где W_ψ — оператор ИВП на основе вейвлета $\psi(x)$, $f(t)$ — анализируемая функции или временной ряд, a — масштаб, b — сдвиг на оси времени, γ — нормирующий множитель, Ω — собственная частота вейвлета Морле. Для удобства интерпретации *амплитудных вейвлет-спектров* $|(W_\psi f(t))(b, a)|$ автором предлагается аналитически обоснованный выбор следующих значений параметров: $\Omega = 2\pi$ для получения соответствия масштаба a в ИВП и периода T в ОФП, $\gamma = 2/a$ для соответствия модуля ИВП амплитуде f_o в ОФП для гармонического сигнала $f(t) = f_o e^{i(2\pi/T)t}$. Автором также получен вид вейвлет-спектра в переменных (b, a) для реального ограниченного во времени гармонического сигнала. При вычислении ИВП интегрирование заменяется суммированием.

Для исследования волновых свойств скалярного поля геофизических параметров автором разработана *интерполяционная модель пространственно-временных колебаний* (ИМПВК). В основу модели положена интерполяция значений данного параметра на фиксированной сетке географических координат на основе измерений параметра на произвольно расположенных станциях. При этом для выделения колебаний в интересующей полосе периодов ряды измерений предварительно обрабатываются ИВП или цифровым полосовым фильтром (ЦПФ).

Пусть $\xi_m(t_k)$ — значение параметра ξ на m -ой станции ($m = 1, \dots, n$) в момент времени t_k (шаг во времени постоянен), θ_m и φ_m — географические координаты (широта и долгота) станции, а $f_m(t_k) = V[\xi_m(t_k)]$ — выделенное колебание, где V обозначает действие ИВП или ЦПФ. Тогда при интерполяции получаем поле колебаний $f(\theta_i, \varphi_j, t_k)$, определенное уже на всей дискретной сетке координат (θ_i, φ_j) , причем точность интерполяции будет зависеть от количества и равномерности распределения станций.

Непосредственное использование сферических (географических) координат для интерполяции неудобно, т. к. требует решения дополнительной проблемы «сшивания» значений около полюсов и нулевого меридиана. Поэтому автором было предложено проводить интерполяцию в декартовых координатах (x, y, z) , а затем интерполированные значения анализировать вновь в сферических координатах:

$$f(\theta, \varphi) = f(x, y, z) = f(\cos \theta \cos \varphi, \cos \theta \sin \varphi, \sin \theta).$$

Для интерполяции скалярных значений $f_m(t_k)$ использован *метод мультиквадрик*, изначально примененный Р. Харди в конце 1960-х гг. для восстановления поверхностей (в двухмерных координатах) по нерегулярно расположенным опорным точкам. В данной работе метод распространен на случай трехмерных декартовых координат. Значения поля $f(x, y, z)$ аппроксимируются функцией

$$f(x, y, z) = \sum_{i=1}^n c_i \left[(x'_i - x)^2 + (y'_i - y)^2 + (z'_i - z)^2 \right]^{1/2},$$

где x'_i, y'_i, z'_i — координаты i -ой опорной точки (станции), c_i — коэффициенты, которые находятся решением системы из n линейных уравнений, образованных подстановкой f_m вместо $f(x, y, z)$ и x'_m, y'_m, z'_m вместо x, y, z .

Наличие интерполированных значений $f(\theta_i, \varphi_j, t_k)$ позволяет на каждом временном шаге k определять направление смещения поля f в окрестности точки (θ_i, φ_j) . Для осуществления такой возможности автором был разработан метод, основанный на алгоритме распознавания образов. Для интересующей точки (θ_i, φ_j) на шаге $k - 1$ строится квадратная матрица A размерностью $r \times r$ (r — нечетно), в которую копируются значения f , вычисленные на сетке координат вокруг этой точки так, что центральная точка матрицы содержит само значение $f(\theta_i, \varphi_j)$. На следующем шаге k по такому же принципу для этой же точки (θ_i, φ_j) строится матрица B . Для определения направления и величины смещения поля за интервал времени $t_k - t_{k-1}$ матрица B сравнивается с матрицей A (рис. 1) со всеми возможными смещениями p и q вдоль строк и столбцов из диапазона $[-L, L]$, где $L < r - 2$ — максимально возможное смещение. Каждой паре значений (p, q) соответствует пересечение матриц, для которого вычисляется функция $D[A', B']$ — мера различия образов, где A' и B' — фрагменты матриц

A и B из области пересечения. В качестве $D[A', B']$ предложено взять сумму модулей разности соответствующих элементов двух матриц с гауссовской оконной функцией, дающей больший вес для центральных точек матрицы. Далее методом перебора определяется пара значений смещения (p^*, q^*) , при которых $D[A', B']$ минимальна. Учитывая логику работы алгоритма, смещением самого поля f от точки (θ_i, φ_j) ($p = 0, q = 0$) будет пара $p' = -p^*$ и $q' = -q^*$. Угол направления смещения определяется как $\arctg(p'/q')$ с учетом знаков p' и q' . Число возможных углов определяется параметром L , которое далее выбрано равным 4, что дает 48 возможных углов. Параметр r определяет пространственные размеры области, в которой распознается перемещение, и должен соответствовать (в градусах широты и долготы) характерному пространственному масштабу исследуемых колебаний или возмущений.

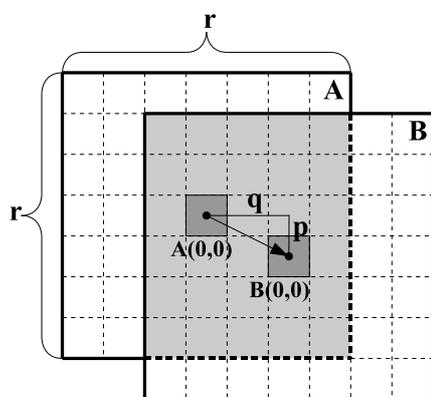


Рис. 1. Определение направления смещения методом распознавания образов, основанном на сравнении двух матриц A (в момент t_{k-1}) и B (в момент t_k). Размер матрицы 7×7 ($r = 7$), текущее смещение ($p = 1, q = 2$).

Проверка точности работы алгоритма была проведена при моделировании бегущей зональной волны на сфере северного полушария на сетке координат с шагом 1° . Результаты показали, что при адекватном выборе параметров L, r и добавлении шума с уровнем $k = 0.10..0.15$ корректность определения направления движения составляет 60–100%.

Таким образом, ИМПВК позволяет изучать распределение колебаний во времени и пространстве и исследовать направления движения (в угловом диапазоне $0-360^\circ$) волновых возмущений различных масштабов.

В третьей главе представлены результаты исследования морфологических закономерностей колебаний параметров Es -слоя с периодами планетарных волн (2–32 суток) в северном полушарии. Исследование проводилось на основе данных международной сети ионосферных станций вертикального зондирования, доступных на Интернет-сервере National Geophysical Data Center (<http://www.ngdc.noaa.gov>). В работе была использована информация по измерениям критической частоты E -слоя f_oE , предельной частоты Es -слоя f_oEs и частоты экранирования f_bEs , проведенным с 1957 по 1998–2003 гг. Анализировалась также относительная электронная концентрация Es -слоя

$$\delta NEs = (NEs - NE) / NE = ((f_oEs)^2 - (f_oE)^2) / (f_oE)^2,$$

где NE и NEs — электронные концентрации в максимумах слоев E и Es соответственно. Параметр δNEs позволяет в значительной степени ис-

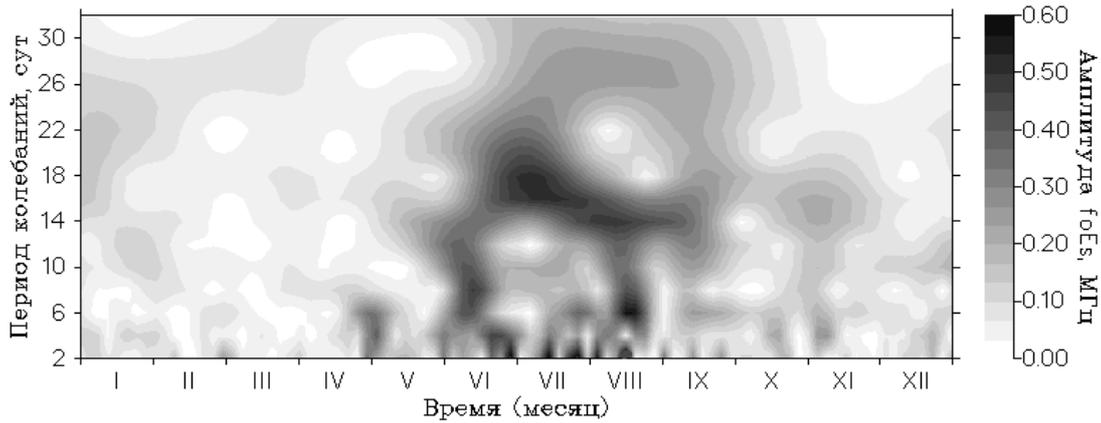


Рис. 2. Вейвлет-спектр $f_o E_s$ в области периодов 2–32 суток по данным среднеширотной ст. IRKUTSK (52,5° с.ш., 104° в.д.), 1985 г.

ключить влияние сезонных изменений фоновой ионизации E -области под действием солнечного излучения при рассмотрении вариаций $f_o E_s$, обусловленных метеорологическими эффектами. Для изучения вариаций 2–32-суточных колебаний E_s -слоя был проведен вейвлет-анализ временных рядов среднесуточных значений $f_o E_s$ и $\delta N E_s$, для этого было отобрано около 70 из 122 станций северного полушария, имеющих данные для непрерывного интервала времени не менее 10 лет.

При анализе спектров отобранных среднеширотных станций за 20–50 лет обнаружены следующие закономерности: 1) параметры среднеширотного E_s -слоя $f_o E_s$ и $\delta N E_s$ испытывают колебания с периодами 2–32 суток и амплитудами, достигающими значений 1–1,5 МГц для $f_o E_s$ и 10–20 для $\delta N E_s$; 2) колебания $f_o E_s$ и $\delta N E_s$ имеют явно выраженный сезонный характер: в летние месяцы июнь–август амплитуды колебаний, как правило, достигают наибольших значений; 3) при анализе данных некоторых станций обнаружены годы с высокими амплитудами колебаний $f_o E_s$ и $\delta N E_s$ зимой, а также поздней осенью и ранней весной, сопоставимыми по величине с летними амплитудами. С точки зрения отмеченных сезонных особенностей принципиальных различий в спектрах $f_o E_s$ и $\delta N E_s$ не обнаружено. На рис. 2 показан типичный для средних широт амплитудный вейвлет-спектр $f_o E_s$ ст. IRKUTSK за 1985 г.

Анализ спектров низкоширотных станций показал отсутствие ярко выраженной сезонности, особенно в летние месяцы. Однако, для ряда японских станций, расположенных в области 26–45° с.ш. 127–142° в.д. характерно повышение амплитуд 4–14-суточных колебаний летом.

На спектрах некоторых станций на широтах 60–75° с.ш. можно отметить преобладание 2–10-суточных колебаний, не имеющее четкой сезонной зависимости. Также, для ряда лет можно отметить значительное понижение амплитуд летних 2–32-суточных колебаний по сравнению с остальными сезонами.

Для выделения доминирующих периодичностей среди 2–32-суточных колебаний были построены среднесезонные спектры, представляющие собой межгодовое усреднение среднесезонных значений амплитуд за весь период измерений данной станции. При этом выбраны следующие интервалы внутрисезонного усреднения: зима (декабрь–февраль), весна (март–апрель), лето (июнь–август) и осень (октябрь–ноябрь). Здесь исключены переходные месяцы май и сентябрь, так как приблизительно в это время происходят весенние и осенние перестройки стратосферной циркуляции (учет этих месяцев мог бы исказить средние значения сезонных амплитуд). Кроме f_oEs и δNEs , анализировались следующие параметры: 1) частота экранирования f_bEs , 2) интервал полупрозрачности $\Delta fEs = f_oEs - f_bEs$, 3) $PEs(5)$ и $PEs(7)$ — вероятности появления Es -слоев с f_oEs выше 5 МГц и 7 МГц. Усреднение за 20–50-летний интервал, значительно превышающий 11-летний солнечный цикл, позволяет получить достаточно надежные оценки средних значений амплитуд колебаний исследуемых параметров.

При анализе среднесезонных спектров установлено, что амплитуды $PEs(7)$ крайне низкие для осени-весны, когда мала вероятность появления Es -слоя с $f_oEs > 7$ МГц. Анализ параметров f_oEs , $PEs(5)$ и $PEs(7)$ для летнего сезона дает почти схожие спектры, а спектры f_oEs , δNEs и $PEs(5)$ схожи и в остальные сезоны. Амплитуда колебаний f_oEs фактически представляет сумму амплитуд колебаний f_bEs и ΔfEs . Обнаружено, что колебания f_oEs в равной степени могут быть обусловлены как f_bEs (основной вклад вносят вариации плазменной частоты), так и ΔfEs (основной вклад вносят вариации неоднородности Es -слоя), а также для ряда станций обнаружено сходство всех трех спектров. Учитывая вышесказанное, далее представляется достаточным рассмотреть только f_oEs как наиболее «универсального» параметра Es -слоя.

При рассмотрении летних спектров среднеширотных станций (рис. 3) выявлено преобладание периодов 4–6 (1-й максимум) и 14–16 суток (2-й максимум), а также для некоторых станций и периодов 22–28 суток (3-й максимум). Ярко выраженный 2-й максимум на периодах 14–16 суток отмечен для 22 станций. Амплитуды 1-го максимума, как правило, выше, а амплитуды 3-го максимума ниже. Для других сезонов четкой закономерности не обнаружено. В ряде случаев отмечено сходство осенних спектров либо с летними, либо с зимними спектрами.

Анализ среднесезонных спектров низкоширотных (11–40° с.ш.) станций показал, что летом на всех долготах наблюдается равномерный спад амплитуд колебаний f_oEs с ростом периода с максимального значения 0.25–0.40 МГц (период 2 суток) до значения 0.10–0.15 МГц (периоды 20–30 суток). При этом для некоторых станций также обнаружены максимумы на периодах 4–6, 14–16 и 22–28 суток осенью-весной.

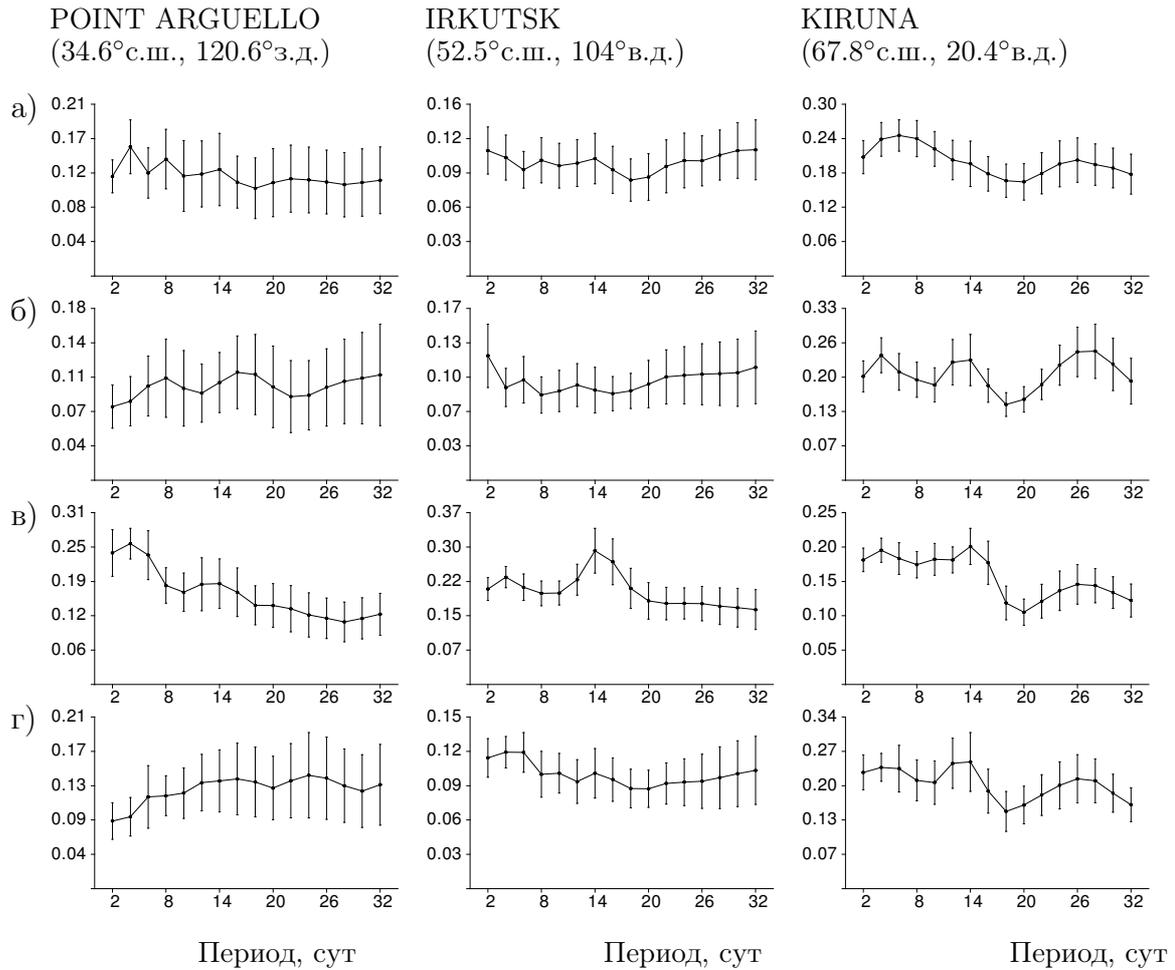


Рис. 3. Среднесезонные спектры f_oEs (а – зима, б – весна, в – лето, г – осень). Вертикальными отрезками обозначены доверительные интервалы для межгодовых средних значений амплитуд, рассчитанные исходя из доверительной вероятности 0.95

На среднесезонных спектрах высокоширотных станций ($> 65^\circ$ с.ш.) четких сезонных закономерностей не обнаружено. Для большинства станций можно отметить уже найденную закономерность: бóльшие амплитуды соответствуют колебаниям с меньшими периодами. Обнаруженные максимумы на периодах 4–6, 14–16 и 22–28 суток наиболее четко просматриваются на спектрах ст. KIRUNA (67.8° с.ш., 20.4° в.д.) и ст. NORILSK (69.4° с.ш., 88.1° в.д.) во все сезоны.

Наличие 2–32-суточных колебаний в параметрах Es -слоя, вероятно, связано с возмущениями этих периодов в нижележащей атмосфере, которые способны проникать на высоты MLT-области как в зимнее время, когда этому благоприятствуют западные ветры в стратосфере, так и в летнее время, когда это может быть обусловлено гравитационными волнами, промодулированными колебаниями с периодами ПВ, а также проникновением ПВ из зимнего полушария в летнее через экватор. Возрастание амплитуд колебаний летом, очевидно, также связано с сезонным увеличением ионизации E -области под действием солнечной излучения.

Выявленные 4–6, 14–16 и 22–28-суточные максимумы в колебаниях параметров E_s -слоя соответствуют характерным периодам ПВ, обнаруженным в вариациях атмосферных параметров. Теоретические расчеты показывают возможность существования в атмосфере волн с этими периодами, при этом *квази 16-суточная периодичность* по результатам многих исследований является доминирующей и наиболее часто обнаруживаемой. Преобладание этой периодичности может быть связано с возмущениями в некоторой полосе периодов, под которой часто понимают интервал 10–20 суток и более. Применяемое ИВП, в силу конечных размеров частотного окна вейвлета, выполняет функцию полосового фильтра и вносит свой вклад в расширение понятия «квази 16-суточная периодичность»: ИВП на масштабе 16 суток выделяет колебания в полосе периодов от 13 до 20 суток, если проводить расчет полосы по уровню 1/2 амплитудно-частотной характеристики. В дальнейшем мы сосредоточим внимание на изучении квази 16-суточной периодичности.

Анализ межгодовых вариаций среднесезонных амплитуд квази 16-суточного колебания f_oE_s показал: 1) возможность превышения зимних амплитуд над летними для некоторых среднеширотных станций в ряде лет, что может быть вызвано внезапными стратосферными потеплениями; 2) наличие колебаний амплитуды с периодами около 2–4 лет.

Был также проведен вейвлет-анализ f_oE_s в области периодов от 1 до 15 месяцев, показавший преобладание годовой и полугодовой периодичностей. Колебания с периодом 1 год синфазны с 11-летним циклом солнечной активности. В амплитудах полугодовых колебаний обнаружены вариации с периодами 2–4 года.

Четвертая глава посвящена исследованию пространственно-временных закономерностей распределения колебаний предельной частоты f_oE_s с периодами 4–28 суток и их связи с квазидвухлетним циклом атмосферной циркуляции.

На основе ИМПВК была проведена интерполяция амплитуды квази 16-суточного колебания f_oE_s на координатной сетке северного полушария с шагом 1° по широте и долготе и временным шагом 4 суток. На каждом временном шаге из наиболее статистически обеспеченного интервала 1970–1989 гг. имелись измерения лишь для 30–50 из 122 станций северного полушария, которые и представляли базовую информацию для интерполяции в каждый конкретный момент. На основе интерполированных значений были построены среднесезонные долготные распределения амплитуды квази 16-суточного колебания f_oE_s для широт $30\text{--}70^\circ$ с.ш., полученные межгодовым усреднением сезонных средних (за 1 год) значений. Обнаружено, что в октябре-апреле на востоке ($0\text{--}150^\circ$ в.д.) низкоширотные ($30\text{--}40^\circ$ с.ш.) амплитуды выше среднеширотных ($50\text{--}60^\circ$ с.ш.); на западе ($45\text{--}130^\circ$ з.д.) амплитуда растет с увеличением широты. Летом на низких широтах амплитуда увеличивается до 0.3 МГц; на высоких широ-

тах — сохраняется значение 0.1-0.2 МГц (30–150° в.д.), при этом амплитуды в восточном полушарии выше на 50% (30–50° с.ш.), чем в западном. Амплитуда на широте 70° с.ш. в основном имеет наибольшее значение на всех долготах и во все сезоны кроме июня-августа.

В рамках ИМПВК возможно выделение волн в поле интерполированных значений параметра и определение направлений движения волновых возмущений. Пусть имеется гармоническая волна вида $\eta(x, y, t) = \eta_0 \cos(kx + ly - \omega t)$, где η_0 — амплитуда, x, y — координаты, t — время, k и l — волновые числа, ω — частота. Фиксируя произвольную точку (x_0, y_0) получаем колебание поля во времени; и наоборот, имея изначально колебания поля в отдельных точках, при интерполяции получаем пространственное распределение колебаний, т. е. волновое поле. В общем случае схема исследования волнового процесса такова: 1) исходные данные обрабатываются ЦПФ или ИВП для выделения полосы частот $\Delta\omega$, соответствующей исследуемой волне; 2) производится интерполяция полученных колебаний в заданной пространственной области; 3) производится визуализация волнового поля для разных моментов времени с целью предварительного анализа; 4) определяются направления движения поля в интересующих точках. В случае применения ЦПФ фактически определяются направления волны; возможно также определение фазы, волновых чисел и оценка фазовой скорости. В случае применения ИВП исследуется перераспределение амплитуды во времени и пространстве и выделяются нестационарные и уединенные волны, т. е. волны с непостоянной во времени амплитудой.

С помощью данной методики были определены характерные сезонные направления движения волновых возмущений в поле вейвлет-амплитуды квази 16-суточного колебания f_oE_s за 1965–1989 гг. и построены среднесезонные угловые гистограммы направлений векторов движения для широт 45–75° с.ш. На рис. 4 показаны гистограммы в полярных координатах для 45° с.ш. восточного полушария, в котором обнаружено четкое преобладание зонального направления для всех долгот. Для западного полушария на широтах 45–60° с.ш. наблюдаются значительные отклонения от зонального направления для областей, включающих небольшое число ионосферных станций. Частота появления западного или восточного направлений в зональном движении в среднем одинакова для восточного и западного полушарий во все сезоны.

Аналогичный анализ волновых движений в поле 16-суточных колебаний f_oE_s , выделенных узкополосным фильтром, обнаружил преобладание направлений в угловых секторах $-45..45^\circ$ от западного и восточного направлений. При увеличении полосы пропускания фильтра до границ 13–20 суток (полоса ИВП), наблюдалось увеличение частоты появлений зональных направлений движения.

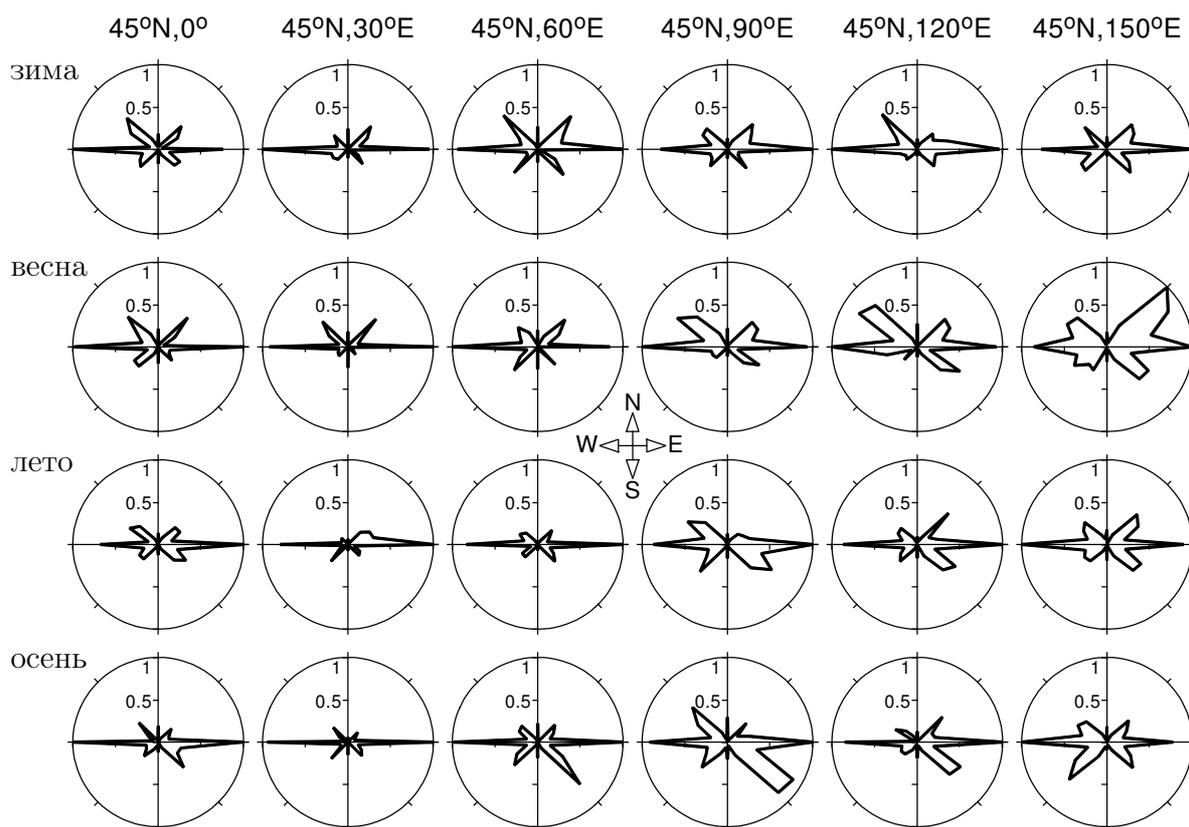


Рис. 4. Среднесезонные диаграммы движения квази 16-суточных возмущений на широте 45° с.ш. в восточном полушарии, 1965–1989 гг.

В предположении о возможном влиянии ПВ на динамику E_s -слоя преобладание зонального направления в движении 13–20-суточных возмущений согласуется с теоретическими выводами и экспериментальными свидетельствами о зональном распространении ПВ в атмосфере.

Практически одинаковая частота появления западного или восточного движений может быть связана с тем, что при построении сезонных гистограмм была учтена только внутригодовая изменчивость (сезонность) в движениях. Как было обнаружено в третьей главе, в вариациях E_s -слоя существуют периодичности более одного года, которые могут быть связаны с глобальными процессами в атмосфере, такими как КДЦ атмосферной циркуляции.

Для изучения влияния КДЦ атмосферной циркуляции на E_s -слой был рассмотрен индекс \bar{u} — среднемесячные значения средней скорости зонального ветра в слое 19–31 км над экватором — основной индекс КДЦ в циркуляции атмосферы. Был проведен корреляционный анализ среднегодовых значений индекса \bar{u} и интерполированных значений f_oE_s и амплитуд 4–24-суточных колебаний f_oE_s . В качестве меры корреляции взят выборочный коэффициент корреляционного отношения Пирсона. В табл. 1 приведены коэффициенты корреляции для f_oE_s и амплитуды 16-суточного колебания f_oE_s . Установлена значимая корреляция индекса \bar{u}

Таблица 1. Коэффициенты корреляции среднегодовых значений \bar{u} с интерполированными значениями предельной частоты f_oEs и амплитуды квази 16-суточного колебания f_oEs (1965–1989 гг.). Жирным шрифтом выделены области значимой корреляции

Широта	Долгота (к востоку от Гринвича)											
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
	Предельная частота f_oEs											
15°	-0.09	-0.20	-0.27	-0.38	-0.45	-0.54	-0.51	-0.41	-0.41	-0.33	-0.27	-0.17
30°	-0.15	-0.20	-0.34	-0.42	-0.51	-0.46	-0.49	-0.47	-0.47	-0.39	-0.32	-0.26
45°	-0.05	-0.13	-0.34	-0.37	-0.45	-0.16	-0.23	-0.26	-0.24	-0.11	-0.23	-0.28
60°	-0.13	0.08	-0.17	-0.21	-0.28	-0.11	-0.35	-0.17	0.04	0.21	-0.09	-0.20
75°	-0.26	-0.27	-0.24	-0.20	-0.34	-0.39	-0.41	-0.39	-0.24	-0.16	-0.17	-0.23
	Амплитуда квази 16-суточного колебания f_oEs											
15°	-0.04	-0.15	-0.27	-0.49	-0.55	-0.56	-0.41	-0.27	-0.34	-0.29	-0.16	-0.12
30°	-0.10	0.01	-0.09	-0.44	-0.49	-0.42	-0.37	-0.24	-0.29	-0.34	-0.13	-0.14
45°	-0.09	0.06	-0.08	-0.26	-0.20	-0.05	-0.36	-0.20	-0.29	-0.19	-0.10	-0.12
60°	0.03	0.12	-0.05	0.10	-0.10	-0.22	-0.28	0.09	-0.13	-0.19	-0.02	-0.01
75°	-0.03	-0.12	-0.16	-0.10	-0.18	-0.18	-0.08	-0.04	0.01	0.02	-0.00	-0.00

с f_oEs и амплитудами 4–24-суточных колебаний f_oEs в секторе долгот 30–270° (отсчет к востоку от нулевого меридиана) и широт 15–75° с.ш.: интенсивность Es -слоя и амплитуды 4–24-суточных колебаний f_oEs максимальны для западнонаправленного ветра в экваториальной стратосфере (восточная фаза КДЦ) и минимальны для восточнонаправленного ветра (западная фаза).

Связь амплитуд колебаний f_oEs с КДЦ атмосферной циркуляции может быть обусловлена: 1) влиянием КДЦ на интенсивность ионизации в Es -слое под действием солнечного излучения, 2) амплитуды колебаний f_oEs масштабов ПВ могут испытывать влияние планетарно-волновой динамики, которая, как было показано в первой главе, уже модулируется КДЦ экваториальной стратосферы. Большинство последних исследований указывает на справедливость второго предположения, исходя из чего можно ожидать КДЦ и в движении волновых возмущений Es -слоя.

Для проверки этого предположения был проведен корреляционный анализ среднегодовых значений индекса \bar{u} и направлений движения 4–24-суточных волновых возмущений f_oEs .

В первом случае в ИМПВК использовались вейвлет-амплитуды колебаний f_oEs с периодами 4, 16 и 24 суток, временной шаг модели составил 1 сутки, общий интервал времени: 1965–1989 гг. Для зональной проекции вектора движения 4-суточного возмущения значимая положительная корреляция обнаружена в области 30–60° с.ш. 120–180° з.д., а для зональной проекции вектора движения 16-суточного возмущения — в области 15–30° с.ш. 120–150° з.д.; т. е. движению волны на запад соответствует восточная фаза КДЦ, движению волны на восток — западная фаза. Для зональной проекции вектора движения 24-суточного возмущения, а также для меридиональных проекций векторов движения 4–24-суточных возмущений не обнаружено областей со статистически значимой корреляцией.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции среднегодовых значений \bar{u} и проекций вектора движения 16-суточной волны f_oEs в северном полушарии (1965–1989 гг.). Жирным шрифтом выделены области значимой корреляции

Широта	Долгота (к востоку от Гринвича)											
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
Зональная проекция												
15°	0.37	0.38	0.27	0.08	0.03	0.10	0.08	0.35	0.01	-0.18	-0.21	0.12
30°	0.39	0.34	0.25	0.06	-0.04	0.15	0.30	0.46	0.07	-0.06	-0.19	0.07
45°	0.31	0.12	-0.03	-0.12	-0.10	0.25	0.41	0.49	0.11	-0.03	0.01	0.13
60°	0.32	-0.01	-0.24	-0.37	-0.21	0.11	0.35	0.35	0.10	0.08	0.06	0.14
75°	0.28	0.01	-0.24	-0.38	-0.14	0.01	0.28	0.15	-0.19	0.12	0.17	0.25
Меридиональная проекция												
15°	0.01	0.20	0.53	0.55	0.38	0.33	0.15	-0.10	0.24	0.10	-0.39	-0.29
30°	-0.15	0.11	0.44	0.58	0.61	0.41	0.17	-0.08	0.22	-0.07	-0.51	-0.29
45°	-0.14	0.14	0.40	0.65	0.74	0.55	0.35	-0.04	0.02	-0.15	-0.39	-0.22
60°	-0.24	-0.00	0.20	0.51	0.75	0.62	0.33	-0.05	-0.10	-0.09	-0.09	-0.14
75°	-0.06	-0.08	-0.06	0.19	0.41	0.54	0.41	0.14	-0.07	-0.06	0.11	-0.01

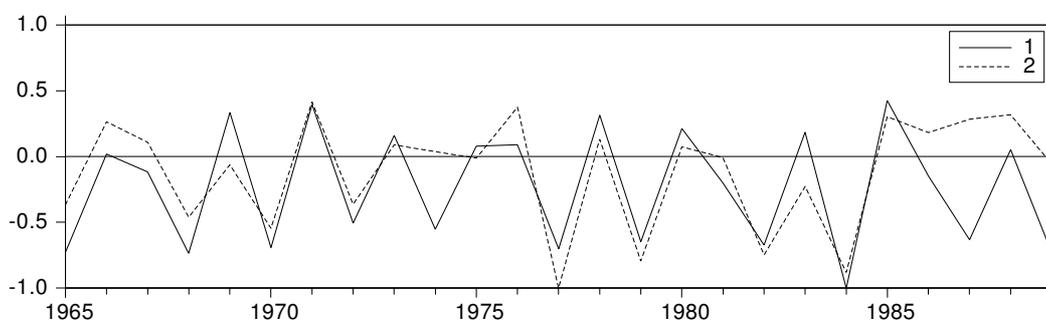


Рис. 5. Среднегодовые значения \bar{u} (1) и меридиональной проекции вектора движения 16-суточной волны в f_oEs (2) для точки 60° с.ш. 120° в.д., пронормированные на единицу

Во втором случае исследовалось волновое движение в поле 16-суточных колебаний f_oEs , выделенных с помощью узкополосного ЦПФ, поэтому здесь уместно использовать термин «16-суточная волна». Результаты корреляционного анализа приведены в табл. 2. Для зональной проекции движения положительная корреляция обнаружена для областей 15–45° с.ш. 0–30° в.д. и 15–60° с.ш. 150–180° з.д., отрицательная (движению волны на запад соответствует западная фаза КДЦ, движению волны на восток — восточная фаза) — для области 60–75° с.ш. 60–120° в.д. Для меридиональной проекции отрицательная корреляция обнаружена для узкой полосы долгот около 60° з.д. Положительная корреляция обнаружена для широкого сектора 60–180° в.д., при этом движение волны на юг наблюдается при восточной фазе КДЦ, на север — при западной фазе; максимальное значение коэффициента корреляции (0.75) приходится на 60° с.ш. 120° в.д. (рис. 5).

Наиболее статистически достоверным можно считать результат анализа корреляции для меридионального движения 16-суточной волны, по-

скольку в этом случае обнаруживаются достаточно высокие значения коэффициентов корреляции и большая область проявления связи. В данном случае под 16-суточной волной нужно понимать всю совокупность волновых процессов, имеющих временной период 16 суток, включая стационарные и нестационарные волны.

В заключении приведены основные результаты диссертации:

1. Разработана интерполяционная модель пространственно-временных колебаний геофизических параметров для исследования волновых процессов с возможностью определения направлений движения волновых возмущений. Модель позволяет изучать волновые процессы в заданном диапазоне периодов и определять направления перемещения в угловом диапазоне $0-360^\circ$.

2. Установлены сезонные закономерности распределения амплитуд 2–32-суточных колебаний частотных параметров E_s -слоя в северном полушарии: для средних широт максимальные значения амплитуд колебаний f_oE_s и δNE_s с преобладанием периодов 4–6, 14–16 и 22–28 суток наблюдаются в летний сезон; для ряда станций отмечено преобладание данных колебаний осенью и весной. Для зимнего сезона не обнаружено регулярного проявления указанных периодичностей. На низких и высоких широтах четких сезонных закономерностей и регулярного проявления указанных периодов не выявлено. Как правило, на среднесезонных спектрах 2–32-суточных колебаний f_oE_s и δNE_s на низких и средних широтах большие амплитуды наблюдаются у колебаний с меньшими периодами. Также обнаружено, что летом на широтах $30-50^\circ$ с.ш. амплитуда квази 16-суточного колебания примерно в 1,5 раза выше в восточном полушарии по сравнению с западным. Наличие 2–32-суточных колебаний в параметрах E_s -слоя предположительно связано с возмущениями этих периодов в нижележащей атмосфере, в частности, планетарными волнами, которые способны проникать на высоты E -области ионосферы, вызывая вариации E_s -слоя. Возрастание амплитуд колебаний параметров E_s -слоя летом, очевидно, также обусловлено сезонным увеличением ионизации E -области под действием потока солнечной энергии.

3. Определены характерные направления движения квази 16-суточных волновых возмущений в поле амплитуд f_oE_s в северном полушарии на основе данных 122 ионозондов за 1970–1989 гг. Для восточного полушария на широтах $45-75^\circ$ с.ш. обнаружено четкое преобладание зонального направления движения квази 16-суточных волновых возмущений E_s -слоя для всех долгот. Для западного полушария на широтах $45-60^\circ$ с.ш. наблюдаются значительные отклонения от зонального направления. Характерных сезонных закономерностей в направлениях движения не отмечено.

4. Обнаружена связь вариаций интенсивности E_s -слоя и направлений движения волновых возмущений в E_s -слое с квазидвухлетним циклом

атмосферной циркуляции. Установлена значимая корреляция среднегодовых значений f_oE_s и амплитуд 4–24-суточных колебаний f_oE_s для широт $15–75^\circ$ с.ш. со среднегодовыми значениями зональной скорости экваториального стратосферного ветра: значения f_oE_s и амплитуды колебаний f_oE_s максимальны при восточной фазе квазидвухлетнего цикла и минимальны при западной фазе. Установлено, что знак корреляции зонального и меридионального направлений движения 16-суточной волны в поле колебаний f_oE_s с зональной скоростью экваториального стратосферного ветра имеет широтную и долготную зависимость. Обнаружена значимая корреляция (на уровне 0.35–0.75) меридиональной компоненты движения 16-суточной волны с зональной скоростью экваториального стратосферного ветра для области $60–180^\circ$ в.д. $15–75^\circ$ с.ш.: северное направление 16-суточной волны преобладает при западной фазе квазидвухлетнего цикла, южное — при восточной фазе.

Основные публикации автора по теме диссертации

1. Шерстюков, О. Н. Синоптические колебания в параметрах среднеширотного спорадического слоя E / О. Н. Шерстюков, Е. Ю. Рябченко // Геомагнетизм и аэрномия. — 2004. — Т. 44, № 5. — С. 661–667.
2. Sherstyukov, O. N. Time-Frequency Analysis of Data Using Morlet Wavelet / O. N. Sherstyukov, E. Yu. Ryabchenko // Georesources (International Journal of Science). — 2001. — № 2(5). — P. 36–39.
3. Sherstyukov, O. N. Wave behaviour of sporadic E-layer variations at the latitudes $30–70^\circ\text{N}$ / O. N. Sherstyukov, E. Yu. Ryabchenko // Adv. Space Res. — 2005. — V. 36, № 11. — P. 2207–2211.
4. Шерстюков, О. Н. Частотно-временной анализ синоптических колебаний в параметрах среднеширотного спорадического слоя E ионосферы / О. Н. Шерстюков, Е. Ю. Рябченко // Электронный журнал «Исследовано в России». — 2002. — № 177. — С. 1956–1967. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/177.pdf>
5. Рябченко, Е. Ю. Применение вейвлет-анализа для исследования временных вариаций ионосферных параметров / Е. Ю. Рябченко, О. Н. Шерстюков // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия. Сборник статей. — Казань, 2001. — С. 278–282.
6. Рябченко, Е. Ю. Определение характерных периодов колебаний в спектрально-неоднородных временных рядах метеорологических параметров / Е. Ю. Рябченко, О. Н. Шерстюков // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия. Сборник статей. — Казань, 2002. — С. 291–296.

7. Рябченко, Е. Ю. Время-частотный анализ параметров спорадического слоя E / Е. Ю. Рябченко, О. Н. Шерстюков // Распространение радиоволн: тезисы XX Всероссийской научной конференции — Н. Новгород, 2002. — С. 300–301.
8. Рябченко, Е. Ю. Пространственные особенности квази 16-суточного колебания в спорадическом слое E / Е. Ю. Рябченко, О. Н. Шерстюков // Распространение радиоволн: сборник докладов XXI Всероссийской научной конференции. — Йошкар-Ола, 2005. — Т. 2. — С. 130–134.
9. Рябченко, Е. Ю. Морфология временных вариаций ионосферных параметров / Е. Ю. Рябченко // Труды общефакультетского научного физического семинара студентов. — Казань: КГУ, 2001. — С. 23–28.
10. Рябченко, Е. Ю. Вейвлет-анализ временных вариаций предельной частоты спорадического слоя E ионосферы / Е. Ю. Рябченко // Тезисы IV Республиканской научной конференции молодых ученых и специалистов. — Казань, 2001. — С. 8.
11. Рябченко, Е. Ю. Частотный анализ временных рядов на основе вейвлетов / Е. Ю. Рябченко // Республиканский конкурс научных работ среди студентов и аспирантов на соискание премии имени Н.И. Лобачевского. Тезисы итоговой конференции. — Казань: КГУ, 2002. — Т. 2. — С. 84–85.
12. Рябченко, Е. Ю. Применение вейвлет-анализа для исследования волновых закономерностей в слое Es / Е. Ю. Рябченко // Тезисы итоговой научной студенческой конференции физического факультета. — Казань: КГУ, 2002. — С. 36.
13. Рябченко, Е. Ю. Исследование волновых закономерностей в спорадическом слое E методом вейвлет-анализа / Е. Ю. Рябченко, О. Н. Шерстюков // Материалы Юбилейной Всероссийской научной конференции «Фундаментальные исследования взаимодействия суши, океана и атмосферы». — Москва: МГУ, 2002 — С. 99–100.
14. Ryabchenko, E. Yu. Seasonal variations in synoptical oscillations of sporadic E layer / E. Yu. Ryabchenko, O. N. Sherstyukov // IUGG abstracts. — Sapporo, Japan, 2003. — http://www.pac.ne.jp/IUGG2003/EN/program.asp?session_id=JSA02-Posters&program_id=018653-1
15. Sherstyukov, O. N. Spatio-temporal variations of sporadic E-layer synoptical oscillations in Europe / O. N. Sherstyukov, E. Yu. Ryabchenko // Workshop on Computational Physics. — С.-Петербург: СПбГУ, 2003. — С. 44–45.

16. Ryabchenko, E. Yu. Wave behaviour of sporadic E-layer variations at the latitudes 30–70°N / E. Yu. Ryabchenko, O. N. Sherstyukov // COSPAR abstracts. — 2004. —
[http://www.cosis.net/abstracts/COSPAR04/02973/
COSPAR04-A-02973.pdf](http://www.cosis.net/abstracts/COSPAR04/02973/COSPAR04-A-02973.pdf)
17. Рябченко, Е. Ю. Волновые процессы в спорадическом слое E / Е. Ю. Рябченко, О. Н. Шерстюков // Тезисы научной конференции физического факультета. — Казань: КГУ, 2004. — С. 41–43.
18. Рябченко, Е. Ю. Пространственно-временные свойства квази 16-суточной волны в Es-слое ионосферы / Е. Ю. Рябченко, О. Н. Шерстюков // Тезисы международной конференции «Фундаментальные проблемы физики», 13–18 июня. — Казань, 2005. — С. 186.