

На правах рукописи

ШЕРСТЮКОВ Олег Николаевич

**ВОЗДЕЙСТВИЕ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ДИНАМИКУ
СРЕДНЕШИРОТНОГО СПОРАДИЧЕСКОГО СЛОЯ Е И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА
РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЕКАМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН**

Специальность 01.04.03 – радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Казань, 2004

Работа выполнена в Казанском государственном университете

Научный консультант: доктор физ.-мат. наук, профессор

Р.Г. Минуллин.

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук, профессор

О.И. Белькович,

доктор физ.-мат. наук, профессор

М.Г. Дёминов,

доктор физ.-мат. наук, профессор

В.А. Иванов.

Ведущая организация – Сибирский физико-технический институт (г. Томск).

Защита состоится _ декабря 2004 г. в __ часов на заседании диссертационного совета Д 212.081.18 в Казанском государственном университете им. В.И. Ульянова-Ленина по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, физический факультет, ауд. 210.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан _____ ноября 2004 г.

Ученый секретарь

Специализированного совета

доктор физ.-мат. наук

А.В. Карпов

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Слой Es является случайным, локальным плазменным образованием в ионосфере со значениями электронной концентрации, которая играет значительную роль при распространении не только декаметровых, но и метровых радиоволн. Слой может способствовать появлению дополнительного канала радиопередачи и приводить к появлению многолучевых помех в радиоканале, или приводить к полному прекращению радиосвязи из-за экранирования на трассах большой протяженности при передаче сигналов через слой F2. Необходимо учитывать влияние слоя Es на распространение радиоволн на трассах в зависимости от их протяженности, технического оснащения и времени работы.

Для долгосрочного прогноза радиоволн построены вероятностные эмпирические модели слоя Es на основе вертикального зондирования (Е.К. Смит, О.В. Чернышев, Т.С. Керблай, О.Г. Овезгельдыев и Г.В. Михайлова, Р.Г. Минуллин). Они удовлетворительно, с определенными ограничениями для каждой модели, описывают пространственно-временные изменения частотных параметров слоя Es. Однако для их применения требуется разработка методов пересчета частотных параметров слоя Es, регистрируемых при вертикальном зондировании, в амплитуды Es-сигналов и максимально-применимые частоты на радиолиниях. Такие методы также имеются (К. Мия и Т. Сасаки, Т.С. Керблай, П.М. Трифонов, Р.Г. Минуллин и др.), однако, они созданы либо на основе модельных описаний изменений коэффициента отражения от слоя Es от частоты, либо на основе экспериментальных измерений в метровом диапазоне волн и не удовлетворяют современным требованиям практики. Методы оперативного прогноза практически отсутствуют, за исключением работ Моисеева С.Н., однако им также применены модельные описания коэффициента отражения от слоя Es для расчета условий распространения в метровом диапазоне волн. Поэтому необходимо продолжение экспериментальных исследований влияния слоя Es на распространение радиоволн с более детальным описанием закономерностей его отражающей способности. Необходимо выявление и описание структурных особенностей слоя Es, которые определяют вариации коэффициента отражения от слоя Es.

Трудности прогнозирования параметров слоя Es объясняются рядом причин, среди которых основными можно назвать: случайность появления слоя Es, отсутствие продолжительных непосредственных измерений характеристик слоя с помощью ракетной техники, многообразие физических явлений, оказывающих воздействие на образование и существование слоя Es.

Область атмосферы на высотах появления слоя Es (верхняя мезосфера и нижняя термосфера) является местом активных преобразований энергии, транспортируемой широким спектром волн из нижней атмосферы. Вследствие этого в атмосфере происходят значительные изменения, которые отражают механизмы происходящих явлений. Так как в данной области скорости аэрономических процессов достаточно малы, то динамическое воздействие нейтрального ветра на ионизированную компоненту будет сравнимо с радиационными факторами.

Исследования слоя Es выявили значительные нерегулярные суточно-сезонные вариации параметров Es-слоев, что предположительно определяется динамическим режимом мезосферы и нижней термосферы. Можно сказать, что в области E имеет

место метеорологический контроль Es-слоя. В этом случае, поведение указанного слоя необходимо связывать не только с воздействием геофизических явлений (солнечная и магнитная активность, зенитный угол Солнца и т.д.), используемых для описания регулярных ионосферных слоев, но и в значительной мере с воздействием метеорологических явлений, таких как термодинамический режим нижней и средней атмосферы Земли и т.д.

Наиболее признанной теорией на сегодняшний день, объясняющей возникновение Es-слоев на средних широтах, является теория ветрового сдвига. Основой этой теории является перераспределение уже существующей ионизированной компоненты атмосферы определенной структурой ветра. Однако из-за сложной структуры мезотермосферного ветра и многообразия факторов, влияющих на поведение слоя Es, данная теория не описывает все многообразие поведения слоя Es.

В связи с этим, требуется проведение комплексных экспериментальных исследований слоя Es и нейтральной составляющей средней атмосферы на высотах 80-130 км, теоретических обобщений результатов их взаимосвязи для построения адекватной физической модели слоя Es.

Решение данной проблемы позволит перейти к оперативному прогнозу параметров слоя Es с учетом солнечной и геомагнитной активности, а также динамического режима нейтральной атмосферы.

Цель работы - исследовать динамику слоя Es и его роль при распространении декаметровых радиоволн.

Для этого необходимо решение следующих задач:

- 1) выявить и описать устойчивые закономерности вариаций параметров слоя Es, характеризующих его структуру и отражающие свойства;
- 2) исследовать взаимосвязь суточно-сезонных закономерностей в параметрах слоя Es с динамикой ветра в верхней мезосфере – нижней термосфере;
- 3) исследовать динамику слоя Es в зависимости от солнечной и геомагнитной активности с учетом режима мезотермосферного ветра;
- 4) выявить эффекты тропосферной и стратосферной циркуляции, влияющие на динамику слоя Es;
- 5) изучить пространственно-временные изменения энергетических характеристик слоя Es и на этой основе построить алгоритмы статистического моделирования радиоканала при наличии слоя Es для долгосрочного и оперативного прогноза условий распространения декаметровых радиоволн.

Методы проведения исследований. Для решения поставленных задач использовались методы статистической радиофизики и методы статистического моделирования. Экспериментальные исследования проведены с применением методов вертикального и наклонного зондирования ионосферы, а также с помощью метода радиометеорного зондирования.

Научная новизна результатов работы определяется тем, что в ней:

- 1) впервые найдено описание спектра неоднородностей слоя Es с учетом статистического спектра турбулентных движений в мезотермосфере, что определяет вариации коэффициента отражения в диапазоне полупрозрачности слоя Es;

- 2) определены факторы влияющие на образование, существование и исчезновение слоя Es, обусловленные составляющими нейтрального ветра с учетом их высотной структуры; впервые экспериментально обнаружено, что одним из этих факторов, является интенсивность мезомасштабной турбулентности;
- 3) выявлена зависимость реакции слоя Es на возрастание солнечной активности от уровня интенсивности слоя и времени суток; впервые для среднеширотного слоя Es в северном полушарии обнаружены долговременные тренды его частотных параметров;
- 4) обнаружено воздействие метеорологических факторов на интенсивность и вероятность появления слоя Es; установлены пространственно-временные вариации частотных параметров слоя Es, согласующиеся с присутствием планетарных волн в атмосфере, в зависимости от сезона, долготы места наблюдения и солнечной активности; впервые найдена зависимость межгодовых вариаций интенсивности летнего Es-слоя, связанная с изменениями дат начала весенней перестройки в стратосфере;
- 5) установлено, что коэффициент отражения от слоя Es и поправочный коэффициент к закону секанса обусловлены не только ионизацией слоя Es, но и зависят от высоты, типа слоя, а также от фоновой ионизации в виде регулярного слоя E;
- 6) предложена методика оценки роли слоя Es при распространении радиоволн (увеличение или уменьшение вероятности радиосвязи, а также появление многолучевости) с учетом оптимального значения порогового уровня сигнала.

Практическая ценность работы состоит в том, что:

- 1) определены факторы необходимые при построении физической модели слоя Es в виде характеристик нейтрального ветра с учетом солнечной и геомагнитной активности, выявлены суточно-сезонные и планетарно-волновые закономерности параметров слоя Es, связанные с динамикой нейтрального ветра;
- 2) разработаны алгоритмы статистического моделирования условий распространения радиоволн при наличии слоя Es для долгосрочного и оперативного прогнозирования параметров каналов связи декаметрового диапазона;
- 3) разработан, изготовлен и внедрен в промышленность цифровой ионосферный комплекс, предназначенные для вертикального и наклонного зондирования ионосферы и слоя Es; создан пакет программ по автоматической и интерактивной обработке ионограмм.

На защиту выносятся:

- 1) модельное представление спектра неоднородностей слоя Es с учетом статистического спектра турбулентных движений в мезотермосфере, что определяет вариации коэффициента отражения в диапазоне полупрозрачности слоя Es;
- 2) закономерности суточно-сезонных и межсуточных вариаций параметров слоя Es, обусловленные влиянием нейтральной составляющей ветра, включая высотную структуру преобладающего ветра, сложную модовую структуру приливного ветра и интенсивность мезомасштабной турбулентности;
- 3) закономерности влияния солнечной и геомагнитной активности на динамику ветра в верхней мезосфере - нижней термосфере и как следствие, на параметры

- слоя Es; закономерности долговременных трендов в частотных параметрах слоя Es и их зависимость от долготы станции наблюдения;
- 4) закономерности вариаций параметров слоя Es в зависимости от тропосферной и стратосферной циркуляции; пространственно-временные вариации частотных параметров слоя Es, согласующиеся с присутствием планетарных волн в атмосфере, и их сезонные, долготные различия, описание взаимных спектров долговременных вариаций нейтрального ветра в мезотермосфере и частотных параметров слоя Es;
 - 5) статистические закономерности вариаций коэффициента отражения слоя Es и поправочного коэффициента к закону секанса, полученные экспериментальным путем методами вертикального и наклонного зондирования;
 - 6) алгоритмы статистического моделирования декаметрового радиоканала при наличии слоя Es для определения распределений уровня Es-сигналов и максимально-применимых частот слоя Es на радиоперелиях с учетом их технической оснащенности.

Реализация результатов работы.

1. Аппаратные разработки и программные пакеты были использованы при изготовлении ионосферного комплекса "Вертикаль-С" Воронежским ЦКБ "Полус". Комплекс прошел государственные испытания, подготовлен к тиражированию. Система обработки ионограмм была создана для ионозондов "Циклон", "Бизон", "Вертикаль-С" и передана в НИИССУ.
2. Результаты использовались при выполнении следующих проектов:
 - программа "Университеты России", тема "Динамика спорадического слоя E и распространение радиоволн", шифр ВГМ-3, 1992-1993 гг. (руководитель); программа "Распространение радиоволн в околоземном космическом пространстве", головной исполнитель - КГУ (1991-1996гг.), раздел "Создание научных основ расчета и прогнозирования условий метеорного и Es распространения радиоволн в интересах создания высоконадежных адаптивных систем радиосвязи и высокоточных дистанционных частотно-временных измерений", (исполнитель);
 - РФФИ 94-05-16090 (1994-1996), Воздействие динамики термосферного ветра на нижнюю ионосферу, (руководитель);
 - РФФИ 01-05-65251 (2001-2003), Волновые процессы и турбулентность в термосфере, (руководитель);
 - РФФИ 03-07-90288, (2003-2005). Информационная система геофизической информации Казанского университета, (руководитель);
 - РФФИ 03-05-96187. (2003-2005). Исследование термодинамического состояния нижней, средней и верхней атмосферы Земли на основе мониторинга фундаментальных параметров нейтральной и заряженной компонент (руководитель);
 - Грант НИОКР РТ №09-9.4-217. 2003г. (руководитель).
3. Результаты использовались при выполнении госбюджетных тем кафедр радиоастрономии и радиопизики Казанского государственного университета; тема "Разработка перспективных дистанционных методов и средств диагностики состояния ионосферы" N гос. рег. 01910050058, 1991-1995гг. (исполнитель); "Исследование физических характеристик верхней атмосферы и солнечно-земных

- связей радиофизическими методами" N гос. рег. 01970008271, 1996-2000гг. (исполнитель); "Радиофизические основы информационных систем" N гос. рег. 01200203344, 2001-2005гг. (руководитель).
4. Результаты использовались при выполнении хоздоговорных работ: ОКР "Разработка аппаратуры ионосферной станции вертикального и наклонного зондирования "Вертикаль С1" [Циклон-9]", шифр "Вертикаль С1-КГУ", заказчик - ВЦКБ "Полюс", 1991-94 гг.; НИР "Исследование и разработка программно-аппаратных средств для автоматической обработки информации", шифр "Тракай-2МС-КГУ", заказчик НИИССУ, 1991-94 гг.
 5. Полученные результаты были включены в отчеты по итогам выполнения различных международных исследовательских программ STEP (1990г.), GLOVNET (1987-88гг.), а также были использованы в учебном процессе кафедр радиоастрономии и радиофизики по дисциплинам "Радиофизические методы исследования атмосферы и ионосферы", "Распространение радиоволн в случайно-неоднородных средах".

Достоверность результатов и научных положений обусловлена большим объемом проведенных исследований, за период с 1983г. по 1994г., статистической надежностью измерений, совпадением результатов измерений и обработанных данных с имеющимися модельными представлениями и выводами других авторов.

Апробация работы.

Основные результаты работы представлялись на Международных, Всероссийских научных симпозиумах, конференциях и семинарах по исследованию слоя Es, аэрономии и динамики мезосферы и нижней термосферы, неоднородной структуры ионосферы и распространению радиоволн. Результаты были доложены и обсуждались на XV, XVI, XVII, XVIII, XIX, XX Всесоюзных (Всероссийских) конференциях по распространению радиоволн (Алма-Ата, 1987; Харьков, 1990; Ульяновск, 1993; С.-Петербург, 1996; Казань, 1999; Н.-Новгород, 2002); на Десятом Всесоюзном семинаре по моделированию ионосферы (Казань, 1990); на XII Всероссийской школе-конференции по дифракции и распространению волн (Москва, 2001); на Всероссийской научной конференции «Фундаментальные исследования взаимодействия суши, океана и атмосферы» (Москва, 2002); на V Российской конференции по атмосферному электричеству (Владимир, 2003); на IX Всероссийской конференции «Физические проблемы экологии (экологическая физика)» (Москва, 2004); а также были представлены на XXIV, XXV Генеральных Ассамблеях URSI (Киото, Япония, 1993; Лилль, Франция, 1996); на XXI, XXII, XXIV Генеральных Ассамблеях IUGG (Боулдер, США, 1995, Бирмингем, Англия 1999, Саппоро, Япония, 2003); на XXXI, XXXII, XXXIII, XXXIV, XXXV Научных Ассамблеях COSPAR (Бирмингем, Англия, 1996, Нагойя, Япония, 1998, Варшава, Польша, 2000, Хьюстон, США, 2002, Париж, Франция, 2004); на XX, XXII, XXIII, XXV, XXVI Генеральных Ассамблеях EGS. (Гамбург, Германия, 1995; Вена, Австрия, 1997, Ницца, Франция, 1998, 2000, 2001), а также докладывались на научных семинарах и конференциях Казанского государственного университета (1990-2004 гг.).

Публикации.

Основные положения диссертации представлены в 110 печатных работах, из них опубликованы в статьях журналов: "Геомагнетизм и аэрономия", "Радиофизика",

“Электросвязь”, “Geomagnetism and Aeronomy International”, “Advances in Space Research”, “J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.”, “Chem. Earth”, “Acta Geod. Geoph. Mont. Hung”, “Environmental Radioecology and Applied Ecology”, “Georesources”; в статьях сборников “Ионосферные исследования” (МГК), “Прием и обработка сигналов в сложных информационных системах” (КГУ), “Метеорное распространение радиоволн” (КГУ), Report UAG и др.

Личный вклад автора. Автор внес основной вклад: в постановку задач исследования, разработку алгоритмов программ управления комплексами и обработки ионограмм, организацию экспериментальных измерений и разработку методик измерений с 1983г., анализ и интерпретацию полученных данных, разработку методов и алгоритмов расчета и прогноза, подготовку публикаций. Автор был ответственным исполнителем работ по разработке измерительного комплекса “Циклон”, участвовал в организации измерений параметров слоя Es с 1983 по 1993 г., осуществлял анализ и интерпретацию результатов измерений коэффициента отражения от слоя Es по данным радиолиний, исследования на которых были организованы и проведены Минуллиным Р.Г. С 1996 г. автор осуществлял научное руководство по всем направлениям исследований слоя Es в КГУ. Экспериментальные исследования взаимодействия нейтрального ветра и слоя Es проведены в кооперации с группой Фахрутдиновой А.Н.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы. Она содержит 445 страниц основного текста, 81 иллюстрацию, 40 таблиц и список цитируемой литературы из 657 наименований.

Основное содержание диссертации

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, дана краткая характеристика выбранного научного направления, сформулирована цель и задачи исследований, приведена краткая характеристика и содержание работы.

В первой главе диссертации описываются экспериментальные установки по исследованию слоя Es методами вертикального и наклонного зондирования, методики измерения и совместного анализа параметров слоя Es и нейтрального ветра, зарегистрированного радиометеорным методом.

Рассматриваются технические характеристики, устройство и принцип действия ионосферного комплекса “Циклон”. Указывается, что с 1983г. в Казанском университете разработано более 10 модификаций комплекса. Работа комплекса может проводиться в режимах вертикального и наклонного зондирования для исследования характеристик Es-сигналов при регистрации амплитуды и формы импульсного сигнала на скользящей частоте, а также для регистрации уровня сигнала на фиксированной частоте зондирования. В исследовательском режиме комплекс позволяет довести периодичность снятия ионограмм до 15 сек. с погрешностью отсчета высоты отражения сигнала, равной 2,5 км, а уровень сигнала регистрировать в динамическом диапазоне 60 дБ.

Описана структура и алгоритмы программного обеспечения комплекса. Данное программное обеспечение позволяет осуществлять управление комплексом, регистрацию и запись ионограмм, обработку ионограмм в автоматическом и интерактивном режимах. При первичной обработке ионограммы и выделения

отраженного сигнала среди помех используется адаптивный порог уровня сигнала на каждой частоте зондирования. Для сохранения уровней сигналов, отраженных от ионосферы, и очищения ионограммы от сосредоточенных помех применен эвристический метод "голосования", основанный на выделении доминирующих максимумов сигналов и их высоты. Затем применяются алгоритмы удаления ложных выбросов амплитуды, которые представляют собой на ионограмме изолированные точки, и удаления кратных точек отражения, а также восстановления утраченных точек, путем возврата к алгоритму выделения изолированных точек с более низкими уровнями значимости. В результате применения данных алгоритмов получаем "укороченную" ионограмму с объемом файла для хранения ионограммы на порядок меньше (12 кБ), чем объем исходной ионограммы.

Задача вторичной обработки ионограммы состоит в разделении следов отражений, принадлежащих различным слоям ионосферы, построению высотно-частотных характеристик и определению ионосферных параметров. Данные задачи выполняются как в автоматическом, так и интерактивном режимах. В программе автоматической обработки ионограммы применяется метод "составления шнуров", совмещенный с масочным методом, с последующей интерпретацией следов отражений. Оценена эффективность автоматической обработки ионограмм для определения критической частоты слоя F2, оказалось, что 82% ионограмм обработаны с удовлетворительной точностью, с погрешностью менее 0,2 МГц. Определены ионограммные особенности следов отражения, которые безусловно требуют привлечения оператора для их интерактивной обработки.

Представлены описания экспериментальных циклов измерений комплексом "Циклон" методами вертикального и наклонного зондирования на меняющейся частоте. Указывается, что целенаправленные комплексные измерения были осуществлены в 1989-1994 гг.; дополнительно также были привлечены данные, полученные нами в 1985-1989 гг. Информация о структуре и динамике слоя Es может быть получена на основе анализа амплитудно-частотных и амплитудно-дальностных характеристик вертикального зондирования. Описана методика определения изменений коэффициента $\rho E_s(f)$ отражения от слоя Es при изменении частоты зондирования.

Представлены краткие характеристики экспериментальной аппаратуры и технические параметры радиолиний, которые использовались для исследования Es-сигналов в данной работе. Указывается, что целенаправленные измерения были осуществлены в 1989-1994 гг. с помощью приемного модуля комплекса "Циклон"; дополнительно были привлечены данные, полученные нами в 1985-1989 гг., а также, полученные Минуллиным Р.Г. в 1972-1983 гг. Зондирование на радиолиниях проводилось в интервале частот от 5 до 45 МГц, что в пересчете на эквивалентные частоты вертикального зондирования соответствует диапазону 2,4-20,0 МГц. В центрах трасс контроль состояния ионосферы осуществлялся с помощью ионосферных станций вертикального зондирования. Оценена энергетика радиолиний.

В радиоканале, работающем в динамическом диапазоне 60 дБ, помимо Es-сигналов регистрируются сигналы, обусловленные другими способами распространения радиоволн, такими как сигналы, отраженные от регулярных слоев ионосферы, возвратно-наклонного распространения, F-рассеяния и ионосферного

рассеяния совместно с отражением от метеорных следов. Поэтому описана методика выделения Es-сигналов в радиоканале на основе амплитудно-временных и импульсно-временных регистраций и определения коэффициента отражения ρ_{Es} на радиолиниях.

Представлены условия комплексных наблюдений параметров слоя Es методом вертикального зондирования (ВЗ) и характеристик нейтрального ветра в мезотермосфере метеорным радаром с высотометром в г. Казани. Даны технические и точностные характеристики метеорного радара, а также представлены параметры нейтрального ветра, регистрируемые радиометеорным методом. Указывается, что регистрация метеорным радаром может нарушаться появлением в канале сигналов возвратно-наклонного распространения, такие моменты времени могут наблюдаться до 40% времени наблюдений. Летом, особенно в вечернее время, регистрации метеорным радаром могут нарушаться из-за появления слоя Es до 20% случаев. Изложена методика исследований параметров слоя Es во взаимосвязи с характеристиками нейтрального ветра, полученными по азимутальной методике. Показано, что можно сопоставлять высотное местонахождение слоя Es с определенной точкой на профиле ветра с точностью, равной 3÷6 км.

Во второй главе диссертации приведены результаты исследований

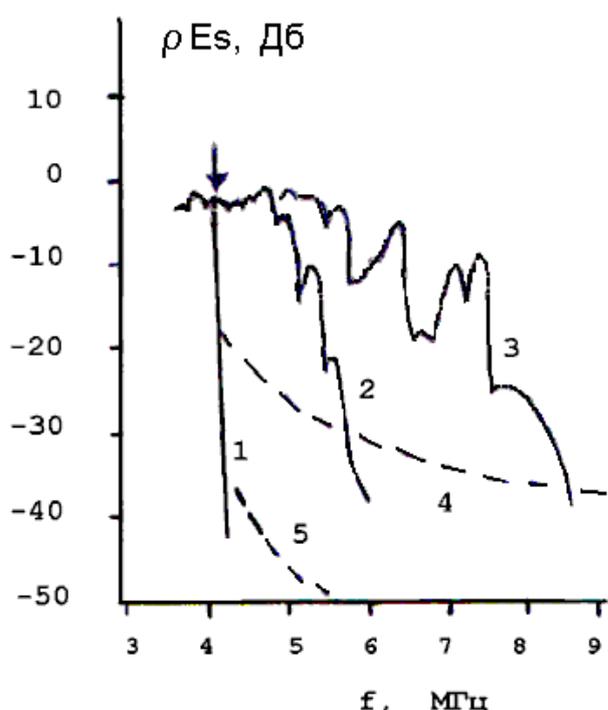


Рис. 1. Изменения коэффициента отражения ρ_{Es} от частоты; полученные экспериментально при ВЗ ионосферы 30.07.88г.: 1- в 9^h30^m, 2- в 10^h00^m, 3- в 10^h30^m LT; а также рассчитанные: 4 - для отражения от градиентного слоя, 5 - для рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях слоя Es.

неоднородной структуры слоя Es при ВЗ ионосферы. Проводится анализ структуры слоя Es и его влияние на радиосигнал при ВЗ. Показано, что слой Es обладает ярко выраженной неоднородной структурой, с масштабами неоднородностей от тысяч километров до десятков метров. При этом толщина слоя колеблется от 300 до 5000 м, а градиент электронной концентрации на нижней границе слоя может достигать величины, равной $2 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3} \text{ км}^{-1}$.

Изучение отражающей способности слоя Es осуществляется на основе сравнения амплитуд сигналов, обусловленных слоями E и Es. Экспериментально установлено, что появление слоя Es в ионосфере сопровождается при регистрации амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) на частотах выше критической частоты f_oE повышением уровня сигнала на 15-20 дБ в зависимости от высоты расположения слоя. Это объясняется уменьшением вклада отклоняющего поглощения при отражении от Es-слоя на

частотах $f > f_{oE}$. Анализ АЧХ позволяет лучше выделять сигналы, отраженные от слоя E_s , на ионограммах ВЗ на фоне сигналов, отраженных от слоя E . Кроме того, на АЧХ иногда наблюдаются интерференционные замирания в частотном интервале от f_{oE} до частоты экранирования f_{bE_s} , обусловленные наличием больших градиентов электронной концентрации на нижней границе E_s -слоя. Анализ данных замираний и сравнение их с расчетными вариациями амплитуды E_s -сигналов позволяет оценить средний градиент электронной концентрации слоя.

Слой E_s может быть полупрозрачным. Диапазон полупрозрачности ($\Delta f_{bE_s} = f_{oE_s} - f_{bE_s}$) определяется изменением коэффициента отражения слоя E_s с частотой зондирования и обусловлен пространственной структурой слоя E_s . Проводится анализ моделей слоя E_s , которые могут объяснить значительные диапазоны полупрозрачности, и представляется сравнение модельных описаний с экспериментально наблюдаемыми вариациями коэффициента отражения с частотой (см. рис.1). Предложено модельное описание спектра неоднородностей слоя E_s , основанное на статистическом представлении экспериментальной структуры спектра турбулентных движений ветра для высот образования слоя. Установлено, что механизм обратного рассеяния от мелкомасштабных турбулентных неоднородностей, соответствующих вязкой и изотропной областям инерционного интервала, не может создавать полупрозрачность слоя E_s со значениями выше 0,5 МГц, при максимально возможных значениях физических параметров, входящих в описание спектра флуктуаций плазмы в нижней термосфере, и не объясняет экспериментально наблюдаемые значения до 1 МГц и более.

Поэтому рассчитывались значения Δf_{bE_s} при отражении от турбулентных неоднородностей, соответствующих крупномасштабной области и архимедовой подобласти инерционного интервала. Представим изменение электронной концентрации внутри слоя E_s в виде $N = \bar{N} \pm \sigma_N$, где σ_N - среднеквадратичное отклонение электронной концентрации за счет неоднородности среды. Предположим, что величина \bar{N} определяется значением частоты экранирования f_{bE_s} , а σ_N соответствует диапазону полупрозрачности слоя Δf_{bE_s} . Величина σ_N оценивалась для турбулентного спектра неоднородностей с размерами в интервале от внешнего горизонтального масштаба L до размеров сопоставимых с первой зоной Френеля. Получено, что диапазон полупрозрачности свыше 1 МГц может быть обусловлен отражением радиоволн от неоднородностей, сопоставимых по масштабам с первой зоной Френеля. Эти значения показали хорошее соответствие экспериментально наблюдаемым величинам Δf_{bE_s} при ВЗ ионосферы, когда для расчетов использовались значения физических параметров спектров флуктуаций электронной концентрации, определяемым по данным одновременных ракетных измерений. Наибольшее влияние на величину Δf_{bE_s} будут оказывать скорость спектрального переноса меры неоднородности, которая зависит от градиента электронной концентрации на границе слоя, и коэффициент турбулентного переноса, характеризующий интенсивность турбулентности в нижней термосфере.

При отражении радиоволн от слоя E_s на частотах $f < f_{bE_s}$ наблюдаются вариации ρ_{E_s} в диапазоне от -10 до 10 дБ (см. рис.2), что обусловлено соответственно эффектами дефокусировки и фокусировки радиоволн на

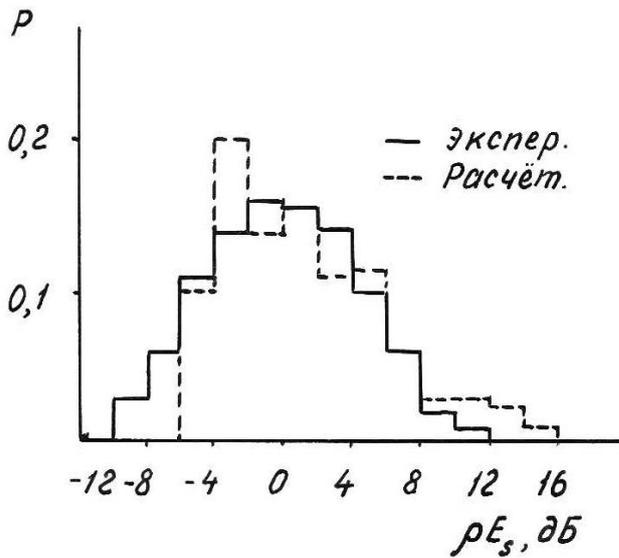


Рис.2. Распределение отклонений ρE_s от единицы (в дБ) при $f \leq f_b E$; сплошная линия - эксперимент, штриховая линия - расчет.

могут объяснить образование спорадического слоя E. Установлено, что наибольшее распространение получила теория ветрового сдвига (ТВС), которая основана на перераспределении уже существующих ионов и электронов под действием ветрового

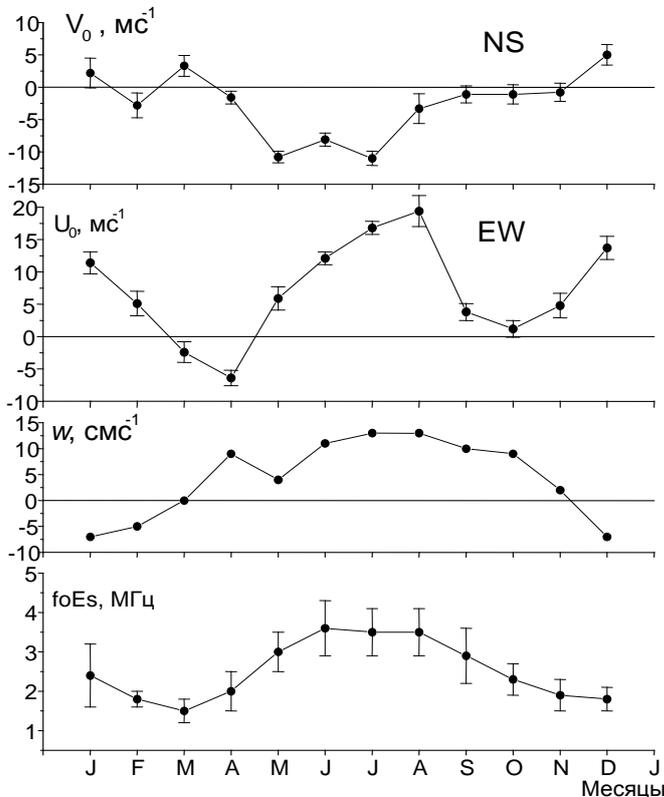


Рис.3. Сезонные вариации преобладающих меридиональных V_0 (а), зональных U_0 (б), вертикальных ω (в) движений и предельной частоты foE_s слоя Es (г).

крупномасштабных неоднородностях слоя Es. Для доказательства данного положения производилось сравнение экспериментального распределения ρE_s с расчетным распределением, полученным в результате статистического моделирования для слоя Es с квазипериодической пространственной структурой. Наблюдается их удовлетворительное соответствие. Параметры слоя Es, описывающие его пространственную структуру, получены на основе учащенных измерений при ВЗ.

В третьей главе диссертации представлены результаты исследований динамика слоя Es в зависимости от состояния мезотермосферы. Проведен аналитический анализ теорий, которые

- а) могут объяснить образование спорадического слоя E. Установлено, что наибольшее распространение получила теория ветрового сдвига (ТВС), которая основана на перераспределении уже существующих ионов и электронов под действием ветрового сдвига и лучше, чем другие теории, согласуется с результатами экспериментов. Показано, что теория ветрового сдвига не позволяет полностью объяснить суточные, внутригодовые и межгодовые вариации вероятности появления интенсивных Es-слоев. Однако с нашей точки зрения, это может быть связано с неполной изученностью системы ветров на высотах верхней мезосферы – нижней термосферы. Поэтому в дальнейшем исследуется влияние временных изменений и высотной структуры нейтрального ветра в верхней мезосфере – нижней термосфере на суточно-сезонные вариации параметров слоя Es.
- б) Показано, что теория ветрового сдвига не позволяет полностью объяснить суточные, внутригодовые и межгодовые вариации вероятности появления интенсивных Es-слоев. Однако с нашей точки зрения, это может быть связано с неполной изученностью системы ветров на высотах верхней мезосферы – нижней термосферы. Поэтому в дальнейшем исследуется влияние временных изменений и высотной структуры нейтрального ветра в верхней мезосфере – нижней термосфере на суточно-сезонные вариации параметров слоя Es.
- в) Показано, что теория ветрового сдвига не позволяет полностью объяснить суточные, внутригодовые и межгодовые вариации вероятности появления интенсивных Es-слоев. Однако с нашей точки зрения, это может быть связано с неполной изученностью системы ветров на высотах верхней мезосферы – нижней термосферы. Поэтому в дальнейшем исследуется влияние временных изменений и высотной структуры нейтрального ветра в верхней мезосфере – нижней термосфере на суточно-сезонные вариации параметров слоя Es.
- г) Показано, что теория ветрового сдвига не позволяет полностью объяснить суточные, внутригодовые и межгодовые вариации вероятности появления интенсивных Es-слоев. Однако с нашей точки зрения, это может быть связано с неполной изученностью системы ветров на высотах верхней мезосферы – нижней термосферы. Поэтому в дальнейшем исследуется влияние временных изменений и высотной структуры нейтрального ветра в верхней мезосфере – нижней термосфере на суточно-сезонные вариации параметров слоя Es.

Сезонные закономерности интенсивности слоя Es, показателем которой являются предельная частота Es-слоя foE_s и условная вероятность появления

интенсивных Es-слоев с $dfoEs=foEs-foE_{me}$ выше определенного уровня 1; 1,5 и 2 МГц, обусловлены сезонными изменениями в динамике ветра с максимумом летом при юго-восточном направлении преобладающего ветра и восходящем направлении движений (см. рис.3). Направление ветра на восток и юг соответствует вертикальному переносу ионов металла направленному вверх. Однако действие меридиональной циркуляции на перенос металлических ионов на высотах 85 - 110 км (интервал регистрации по высоте метеорным радаром) незначительно и возрастает на больших высотах из-за повышения замагниченности ионов. Поэтому для объяснения сезонных изменений в поведении слоя Es необходимо также привлечь крупномасштабные изменения скорости вертикального переноса, которые могут быть ответственны, наряду с другими процессами, за общую концентрацию металлических ионов в области образования слоя Es. Восходящие движения на высотах 100-110 км наблюдаются в основном в летний период, а нисходящие в зимний период, что препятствует образованию слоя Es.

За суточные изменения вероятности появления слоя Es и средней высоты образования слоя Es может быть ответственна сложная структура приливных движений, экспериментально регистрируемая метеорным радаром с высотомером. Влияние суточного прилива на вероятность появления слоя Es не рассматривалось, так как его амплитуда в основном меньше амплитуды полусуточного прилива, а разность фаз между максимумами зональной и меридиональной компонент прилива на одной высоте является неустойчивой. Обнаружено, что время максимумов суточных вариаций средней действующей высоты слоя Es хорошо совпадает со временем прохождения конвергирующего узла (с точки зрения ТВС) зональной компоненты моды (2,2) полусуточного прилива. Для объяснения суточных вариаций предельной частоты слоя Es используются более высокие моды (2,4; 2,6) полусуточного прилива. Отметим, что сезонные вариации фаз этих мод подобны друг другу и не отличаются больше чем на два часа. Однако мода 2,6, из-за меньшей длины волны, будет создавать более благоприятные условия с точки зрения теории ветрового сдвига для образования слоя Es. Показано, что время максимумов суточных вариаций вероятности появления интенсивных слоев Es хорошо совпадает со временем прохождения конвергирующего узла зональной компоненты моды (2,6) полусуточного прилива.

Каждая составляющая ветра в верхней мезосфере – нижней термосфере: преобладающий ветер, приливные волны, внутренние гравитационные волны и турбулентность, может осуществлять перераспределение уже существующей метеорной ионизации, приводя к образованию Es-слоев. Поэтому анализируется влияние каждой из этих составляющих ветра с учетом их высотной изменчивости на параметры слоя Es.

При учете высотного распределения преобладающего ветра получено, что благоприятным условием для формирования интенсивных Es слоев является ветер, направленный на северо-восток в высотном интервале 100-110 км. Сравнительный анализ высотных изменений преобладающего ветра и среднесуточных значений $\langle \delta foEs \rangle = (foEs - foE_{me}) / foE_{me}$ для июня 1986г. показал, что коэффициент корреляция параметров интенсивности слоя и преобладающего меридионального ветра $R(\langle \delta foEs \rangle, V_0) = 0,52$ выше, чем для зонального $R(\langle \delta foEs \rangle, U_0) = 0,36$. Однако при усреднении параметров за трое суток коэффициент корреляции повышается

$R(\langle \delta f_o E_s \rangle, V_0) = 0,6$; $R(\langle \delta f_o E_s \rangle, U_0) = 0,56$. Таким образом, преобладающий ветер направленный на восток осуществляет дрейф ионов по направлению вверх, а направленный на север препятствует их вымыванию из области 110-120 км. В такой ситуации преобладающий ветер играет не столько прямую роль по образованию Es-слоев, сколько косвенную роль, создавая повышенную фоновую концентрацию металлических ионов, из которой затем за счет больших конвергирующих градиентов ветра (ВГВ, приливы) образуются интенсивные слои Es.

Выполнено сопоставление наблюдаемых с помощью ионозонда параметров вертикального движения Es-слоев с параметрами ветров, рассчитанными в соответствии с теорией приливов и ТВС по данным метеорологического радара для летних измерений 1993г. Обнаружены одновременные спуски Es-слоев и различных узлов нескольких мод полусуточного прилива. Большую часть дня в высотном интервале 90-115 км Es-слои спускаются со скоростями, близкими к фазовой скорости моды (2,6). Однако в утренние и вечерние часы наблюдаются "сверхбыстрые" спуски

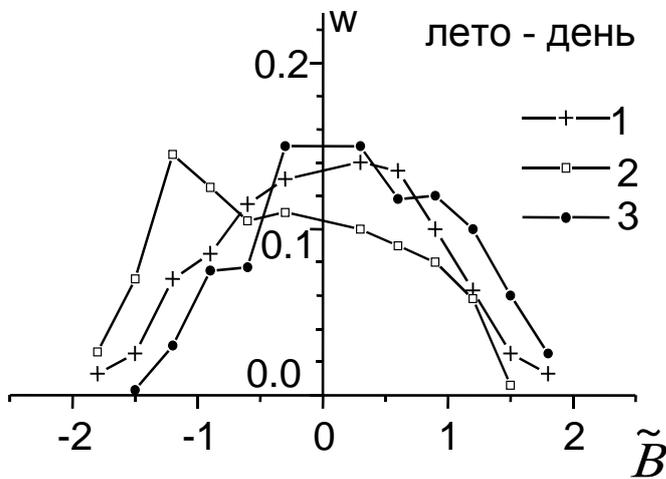


Рис.4. Распределения нормализованных среднечасовых значений мезомасштабной турбулентности \tilde{W} для дневных часов летнего сезона: 1 - общее распределение значений параметра \tilde{V} ; 2,3 - условные распределения значений параметра \tilde{V} при условии, что нормализованные значения $f_b E_s$ $\tilde{f} > 0.8$ (2), $\tilde{f} < -0.8$ (3).

последовательных Es-слоев в высотном интервале 120-160 км, обусловленные действием ветровой системы около дивергирующего узла моды (2,2) меридионального ветра; значения $f_o E_s$ для этих Es-слоев имеют повышенные значения в 0 и 9-12 LT, когда конвергирующий узел зонального ветра проходит высотный интервал 100-115 км, и снижаются до величины $f_o E$, когда он опускается до высоты 95 км. (5-6h и 17-19h LT).

Установлено существенное влияние мезомасштабной турбулентности нейтрального ветра (параметр V описывает нерегулярные движения с временными вариациями за интервал менее 1 часа) на интенсивность и неоднородную структуру слоя Es. По часовым измерениям для всех сезонов в 1986-1988 гг. наблюдаются более интенсивные, возможно экранирующие Es-слои, в случае менее развитой мезомасштабной турбулентности и отсутствие Es-слоев или слабые по интенсивности полупрозрачные Es - образования при повышенных значениях турбулентности в нижней термосфере (см. рис.4), что объясняется увеличением турбулентной диффузии, которая может приводить к разрушению слоя Es. На основе однофакторного дисперсионного анализа показано, что степень влияния суточных вариаций параметра V на дисперсию среднесуточных значений частоты экранирования $\langle f_b E_s \rangle$ меняется для разных месяцев от 20 до 65%; наиболее значительное воздействие наблюдается зимой и летом по сравнению с весной и осенью.

В четвертой главе диссертации представлены результаты исследований динамики слоя Es под влиянием солнечных и геомагнитных факторов. Для этого был предварительно проведен аналитический анализ долговременных вариаций параметров нейтрального ветра и их зависимость от солнечной и геомагнитной активности. Представлено, что динамика нейтрального ветра в верхней мезосфере - нижней термосфере существенным образом менялась на протяжении примерно 3-х циклов вариаций солнечной активности: обнаружены значимые долгопериодные тренды в зональной и меридиональной составляющих преобладающего ветра, а также амплитудах суточной и полусуточной гармоник ветра. В целом, по среднегодовым значениям преобладающего ветра наблюдается отрицательная корреляция зональной циркуляции и положительная, менее значимая, корреляция меридиональной циркуляции от солнечной активности. Для высотного интервала 90-110 км имеется обратная зависимость амплитуды полусуточного прилива от солнечной активности.

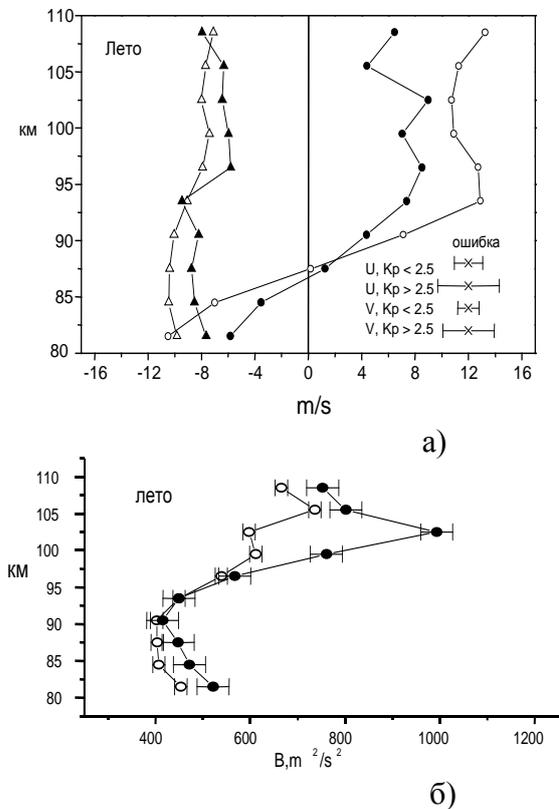


Рис. 5. Высотные изменения летнего зонального (кружки) и меридионального (треугольники) преобладающего ветра (а) и мезомасштабной турбулентности (б) в зависимости от геомагнитной активности.

По данным измерений метеорологического радара в г. Казани за 1986-1990 гг. и 1993-1995 гг. исследовалось влияние геомагнитной активности на динамику ветра в нижней термосфере. Обнаружено, что данное влияние наиболее заметно для крупномасштабных составляющих ветра (преобладающий ветер, приливы), и убывает с уменьшением пространственного и временного масштабов рассматриваемых процессов. Обнаруживается торможение преобладающего зонального ветра и появление составляющей меридионального ветра, направленной на север, при повышении уровня геомагнитной активности (см. рис.5а). Также наблюдается значительное увеличение значений мезомасштабной турбулентности (до 60%) в интервале высот 104-110 км при повышении геомагнитной активности (см. рис.5б).

Для 22 среднеширотных станций северного полушария анализировались долговременные вариации частотных параметров Es-слоя: $fbEs$, $foEs$ и диапазон полупрозрачности $\Delta fbEs$, за период 1957-1990 гг. Описание долговременных вариаций частотных параметров производилось с использованием двух моделей: в первой модели выделяется только линейный тренд, во второй дополнительно учитывается влияние солнечной и геомагнитной активности. Оказалось, что при переходе ко второй, более сложной модели, наблюдается уменьшение величины выявленных трендов для 67%, которое по абсолютной

величине не превышает 25%. Поэтому, наблюдаемый тренд в частотных параметрах слоя Es не может быть объяснен долговременными вариациями солнечной и геомагнитной активности.

В параметре fbEs для большинства рассмотренных станций наблюдается положительный тренд, величина которого на некоторых станциях достигает 0,08 МГц/год. Для параметра foEs наблюдается различие знака тренда для отдельных станций для разных сезонов. В зависимости от географического положения станции: отрицательный тренд значений foEs преобладает в континентальной части территории России, положительный – в Западной Европе. В диапазоне полупрозрачности $\Delta fbEs$ преобладает отрицательный тренд, величина которого на некоторых станциях достигает – 0,07 МГц/год. Величина тренда в параметре foEs связывается с соотношением величин вариаций foEs и $\Delta fbEs$. При малой величине отрицательного тренда в параметре $\Delta fbEs$, в рядах значений параметра foEs может наблюдаться положительный тренд ($foEs = fbEs + \Delta fbEs$), а при значительном отрицательном тренде в $\Delta fbEs$ – возможен отрицательный тренд значений foEs. Одним из возможных объяснений причин таких трендов может быть изменение условий образования слоя Es из-за долговременных вариаций характеристик мезосферы - нижней термосферы.

После устранения долговременных трендов, анализировалось влияние солнечной активности на предельную частоту foEs, параметр $\langle \delta foEs \rangle = (foEs - foEme) / foEme$ и вероятность появления Es-слоя PEs для фиксированных уровней foEs, в зависимости от сезона и времени суток. Обнаружена сильная положительная корреляция (0,94) среднегодовых дневных значений $\langle foEs \rangle$ с уровнем солнечной активности, которая вызвана вкладом регулярного слоя E. В ночное время, когда регулярный E слой отсутствует, корреляция значений $\langle foEs \rangle$ с уровнем солнечной активности отрицательная (-0,38). Данный вывод согласуется с результатами, полученными для параметра $\langle \delta foEs \rangle$, при вычислении которого наблюдается отрицательная корреляция с уровнем солнечной активности (для дневных значений – 0,80; для ночных значений – 0,49). Анализировались изменения коэффициента корреляции вероятности появления Es-слоя $PEs(foEs > f_{пор})$ с солнечной активностью для разных частотных уровней: положительная корреляция наблюдается для $f_{пор}$, равных 3 и 4 МГц (0,85; 0,7) и отрицательная для $f_{пор} = 6$ и 7 МГц (-0,19; -0,53). Наблюдаемые вариации коэффициента корреляции PEs с уровнем солнечной активности вызваны, по-видимому, различием в типах ионов, формирующих Es-слои разной интенсивности: интенсивные Es-слои образованы из металлических ионов, а слабоинтенсивные – из молекулярных ионов. Изменения вариаций преобладающего ветра и интенсивности мезомасштабной турбулентности могут объяснить обратную корреляцию вероятности появления интенсивных Es-слоев в зависимости от солнечной активности.

Влияние геомагнитных возмущений на интенсивность слоя Es исследовалось в зависимости от интенсивности слоя для суток, предшествующих возрастанию геомагнитной активности, сезона, времени суток и уровня солнечной активности. Обнаружены различия реакции слоя на прохождение геомагнитного возмущения от состояния слоя в предшествующие возмущению сутки, то есть уменьшение среднесуточных значений $\langle \delta foEs \rangle$ происходит в случае, если в предшествующие возмущению сутки существовал интенсивный слой Es, а увеличение – в случае, если

в предшествующие возмущению сутки слой Es отсутствовал, или был слабо выражен. В основном преимущественно обнаруживается понижение интенсивности слоя Es в день максимума геомагнитного возмущения зимой (до 35%) и летом (до 30%). При этом, восстановление состояния слоя Es зимой происходит преимущественно на следующие сутки после прохождения геомагнитного возмущения, а летом этот процесс более длителен. Реакция слоя Es на геомагнитные возмущения более выражена в темное время суток (21-03 LT), чем в светлое (09-15 LT), а также при низкой солнечной активности ($W < 90$), по сравнению с высокой ($W > 90$).

Наблюдаемые эффекты в слое Es связываются с изменениями динамики нейтральной атмосферы: ослаблением направленной на юг меридиональной и направленной на восток зональной составляющих преобладающего ветра, а также усилением интенсивности мезомасштабной турбулентности под влиянием геомагнитных возмущений.

В пятой главе диссертации представлены результаты исследований влияния эффектов нижней атмосферы на параметры слоя Es. Проведен аналитический анализ влияния метеорологической обстановки в тропосфере и стратосфере на параметры слоя Es. Выявлены синоптические объекты в тропосфере и стратосфере, которые могут приводить к вариациям интенсивности слоя Es. В качестве механизма влияния процессов в нижней атмосфере на слой Es определены планетарные и внутренние гравитационные волны.

Показано, что в межсуточных вариациях параметров слоя Es наблюдаются вариации сходные с периодами планетарных волн в нейтральном ветре мезотермосферы. Разработана методика вейвлет-анализа для исследования волновых возмущений в параметрах слоя Es в области синоптических периодов от 2 до 32 суток. Установлено, что в волновых возмущениях, обнаруживаемых в вариациях

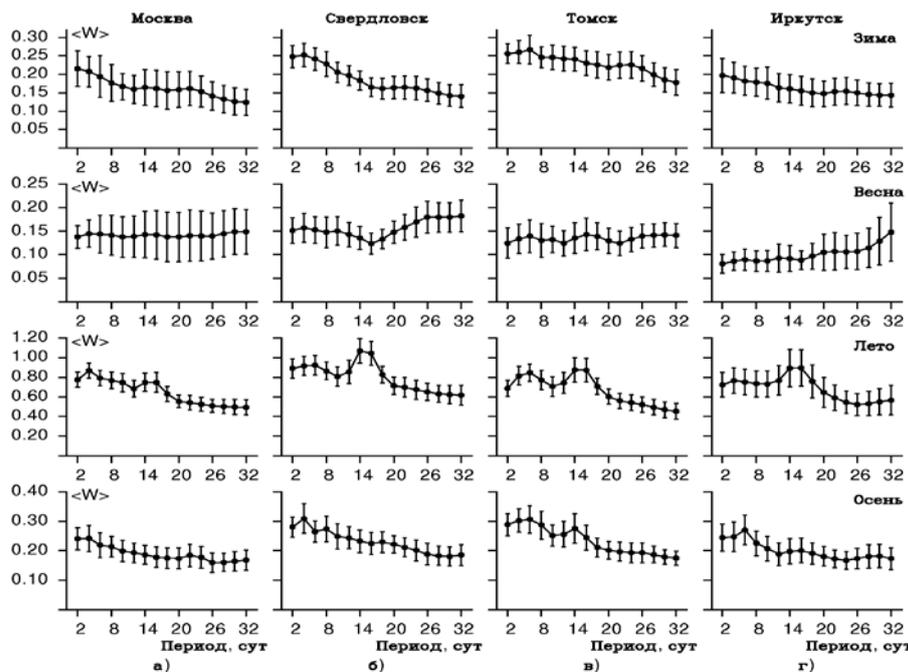


Рис. 6. Сезонные глобальные спектры синоптических колебаний foEs (а — ст. Москва, б — ст. Свердловск, в — ст. Томск, г — ст. Иркутск).

параметров слоя Es, наблюдаются характерные периоды планетарных волн 4-6 и 14-16 суток, морфологические закономерности которых исследуются в зависимости от сезона и солнечной активности (см. рис.6). Наибольшие значения амплитуды волновых возмущений наблюдаются в летние месяцы, различие по величине с другими сезонами доходит до 5 раз.

Корреляция средних амплитуд волновых возмущений в частотных параметрах слоя Es от солнечной активности исследовалась для интервала данных с 1957 по 1989 г. В летнее и зимнее время наблюдается отрицательная корреляция (максимальные значения значимые, достигающие $-0,37$), весной и осенью в среднем положительная (не выше $0,26$).

На основе анализа 30-летнего ряда ионосферных данных для среднеширотной области Северного полушария с количеством станций, достигающим 30-35 в разные годы, методом наименьших квадратов для среднесуточных значений foEs выделяются планетарные волны с волновыми числами 1, 2 и исследуются их характеристики. Наблюдающиеся волны можно назвать квазипериодическими, т.е. наличие участков с неизменной или медленно перемещающейся фазой, перемежается резкими фазовыми скачками в течении 1-2 суток и в дальнейшем волна проявляется с другой начальной фазой. Если построить вероятностное распределение географических долгот, соответствующих данным начальным фазам волн, то максимумы их вероятности в основном относятся к двум областям $-30-60^{\circ}$ E и $210-240^{\circ}$ E географической долготы. Для летних измерений 1986-1987 гг. определены характерные периоды этих волн, составляющие 4-6 (волновое число K равно 2) и 20-24 суток (K=1).

Проведено сравнение волновых возмущений в частотных параметрах слоя Es и интенсивности мезомасштабной турбулентности нейтрального ветра. Выделенные периодичности в вариациях исследуемых параметров являются когерентными, в то время как фазовые соотношения меняются в зависимости от периода и сезона. Это можно объяснить непосредственным влиянием межсуточных вариаций мезомасштабной турбулентности на вариации частотных параметров $\delta fbEs$ и $\delta foEs$. Наблюдаемые периодичности, в основном, являются противофазными для всех сезонов, за исключением весны.

Определено, что нарушение зонального западного переноса в средней тропосфере на изобарической поверхности 500 гПа сопровождается повышением в межсуточных вариациях вероятности появления интенсивных слоев Es. Причиной

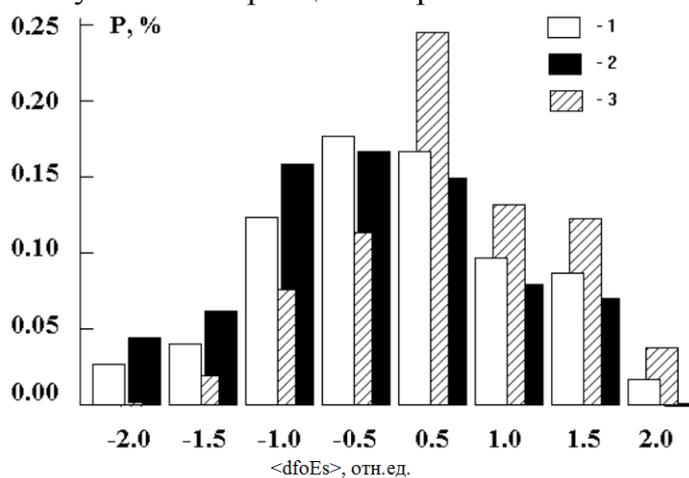


Рис. 7. Общее распределение $P\langle dfoEs \rangle$ (1), а также распределения $P\langle dfoEs \rangle$ для лет с поздними (2) и ранними (3) сроками ВПЦ.

таких региональных нарушений общей циркуляционной системы тропосферы летом являются блокирующие образования, появления интенсивных слоев Es над различными областями которых неодинаково, что объясняется различными возможностями генерации внутренних гравитационных волн.

Способность гравитационных волн проникать из нижних слоев в верхние определяется направлением и величиной зональных ветров в стратосфере и нижней термосфере. Для того, чтобы проверить наличие воздействия направления зональных

ветров на вероятность появления интенсивных Es-слоев было проведено сравнение дат перехода от малоинтенсивных (зимних) к интенсивным (летним) Es-слоям, и наоборот, с датами весенне-осенних перестроек в термомезосфере и в стратосфере. Информация о параметрах Es-слоев была получена на ст. Алма-Ате (43°N), ст. Горький (55°N), а ветре – на метеорном локаторе в г. Фрунзе (43°) и г. Обнинске (55°N), а о датах стратосферной перестройки циркуляции – по картам изобарической поверхности 10 гПа в северной ($70\text{-}50^{\circ}\text{N}$) и южной ($50\text{-}35^{\circ}\text{N}$) зонах. Установлено, что даты весенних и осенних переходов в интенсивности слоя Es наиболее близко расположены к датам весенне-осенних перестроек циркуляции в стратосфере в южной зоне, из-за сезонных изменений ее фильтрующих свойств.

Сроки начала сезонных перестроек зональной циркуляции в нижней мезосфере и стратосфере часто используются в долгосрочных прогнозах погоды. Исследовалось влияние дат начала весенних сезонных перестроек циркуляции (ВПЦ) в стратосфере (для внетропических широт северного полушария на поверхности 10 гПа) на интенсивность ионизации Es-слоя $dfoEs$ в летний период (для 8 станций ВЗ умеренных широт: $50\text{-}60^{\circ}\text{N}$, $20\text{-}100^{\circ}\text{E}$). Межгодовые вариации интенсивности летнего Es-слоя находятся в зависимости от сроков начала весенней перестройки в стратосфере, при этом наибольшее влияние проявляется в мае-июле и нарушается в августе. В годы с ранними сроками перестройки средние летние значения $dfoEs$ повышаются примерно в 1,5 раза по отношению к годам с поздними сроками перестройки (см.рис.7). Данные межгодовые вариации интенсивности слоя Es объясняются квазидвухлетними вариациями циркуляции в экваториальной атмосфере, в соответствии с которой происходят изменения интенсивности меридионального переноса и обострения квазистационарных барических волн в среднеширотной атмосфере.

В шестой главе диссертации представлены результаты исследований влияния слоя Es на распространение декаметровых радиоволн. Проводится анализ закономерностей характеристик слоя Es на радиоперелиях при работе на фиксированных рабочих частотах. Рассматриваются вероятностные и энергетические характеристики сигналов, обусловленных слоем Es. Показано, что вероятность и длительность отражений от слоя Es существенным образом зависят от энергетики радиоперелии.

Исследования влияния слоя Es на распространение декаметровых радиоволн, с учетом энергетических характеристик радиосигналов, проводились с помощью комплекса "Циклон" при зондировании на скользящей частоте и на нескольких фиксированных частотах на трассе Москва-Казань протяженностью 700 км. Изучался модовый состав и распределения амплитуд сигналов, на основании которого определены несколько диапазонов частот с разной ролью слоя Es в распространении радиоволн при его появлении в центре трассы. Во-первых, значительно (от 0,5 до 1,5 МГц) расширяется диапазон применимых частот за счет слоя Es с повышенными электронными концентрациями. Во-вторых, ухудшается качество связи в средней части диапазона применимых частот из-за многолучевости, которая порождается появлением Es-сигналов, наряду с сигналами, отраженными от регулярной ионосферы. В-третьих, улучшается качество связи в нижней части диапазона при исчезновении многолучевости вследствие экранирования Es-слоем сигналов, отраженных от слоя F2.

Сигналы, формирующие следы на ионограммах ВЗ и НЗ имеют уровень не ниже -30 дБ и обусловлены в большинстве случаев механизмом отражения. Ионограммы наклонного зондирования способствуют выделению интервалов времени при регистрации уровня сигналов на фиксированных частотах, когда они обусловлены отражением и рассеянием от слоя Es. Изломы на интегральных распределениях амплитуды сигнала являются границами по уровню, которые отделяют один способ распространения от другого. Анализ распределения амплитуд Es-сигналов показывает, что уровень более -30 дБ соответствует отраженному сигналу, в интервале от -30 до -48 дБ может быть, как отраженным, так и рассеянным и менее -47 дБ только рассеянным сигналом. Поэтому, значительно повысить надежность связи на радиолинии до 1,5 раз в зависимости от рабочей частоты и времени суток, или расширить диапазон применимых частот днем на 4,5 МГц, ночью на 1,5 МГц можно при оптимальном пороговом уровне сигнала на радиолинии, равном -45 дБ.

Исследуются распределения коэффициента отражения от Es-слоя ρ_{Es} , что позволяет исключить влияние технических параметров аппаратуры на радиолинии, а также поглощения в нижележащей ионосфере при изучении отражающей способности слоя Es. Установлена зависимость распределения ρ_{Es} от длины и рабочей частоты радиолинии, времени суток и типа отражающего слоя. Показано, что распределение ρ_{Es} имеют точки перегиба аналогично распределению средних амплитуд сигналов, что позволяет определить границу между сигналами отраженными и рассеянными слоем Es, равную -35 дБ.

Рассмотрены флуктуационные характеристики Es-сигналов, в результате определена зависимость частоты фединга F от величины коэффициента отражения ρ_{Es} , которую можно описать в виде $\lg F = -0,026 \lg(\rho_{Es}) - 0,8$, с коэффициентом корреляции, равным 0,61. До значения, равного -40 дБ, частота флуктуаций в

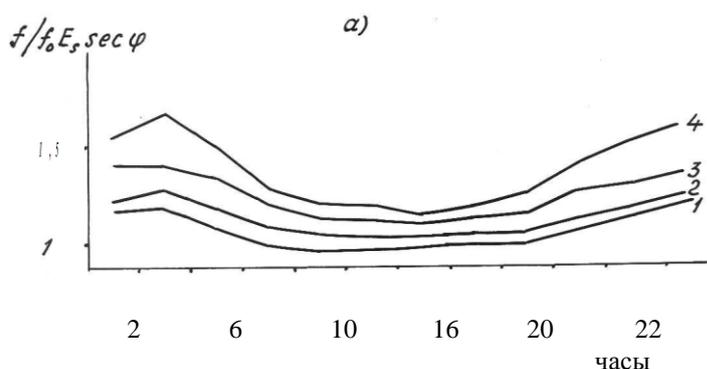


Рис.8. Вариации коэффициента K в течение суток на трассе Москва-Казань для $f=15$ МГц при постоянных уровнях $(\rho_{Es})_{пор}$ (1-20; 2-30; 3-40; 4-46 дБ).

некоторые моменты времени может быть небольшой, от 0,02 до $0,01 \text{ c}^{-1}$, что характерно для отраженных сигналов. Для $\rho_{Es} < -40$ дБ частота флуктуаций более $0,15 \text{ c}^{-1}$ и будет соответствовать рассеянным сигналам. Распределение $P(\lg F)$ зависит от соотношения между $f_{эКВ}$ и f_{bEs} при ВЗ в центре трассы.

Исследуются частотные зависимости коэффициента отражения от частоты в зависимости от параметров слоя Es

в центре радиолинии. Установлено, что ρ_{Es} при наклонном падении наиболее хорошо коррелирует с f_{oEs} , по сравнению с f_{bEs} . Обнаружены изменения отражающей способности слоя Es с частотой в зависимости от типа слоя, времени измерений и высоты расположения слоя.

Исследуются частотные зависимости коэффициента отражения от частоты в зависимости от параметров слоя Es

На среднестатистической основе получена аналитическая зависимость, позволяющая определять значения ρE_s при наклонном падении радиоволн в зависимости от предельной частоты $f_o E_s$ и критической частоты E слоя $f_o E$, регистрируемых в центре трассы, а также рабочей частоты и длины радиолинии:

$$\lg \rho E_s = 0,58 - 1,57 \cdot \frac{f_{\text{ЭКВ}}}{\sqrt{f_o^2 E_s - f_o^2 E}},$$

для $f_o E_s > f_o E$, в противном случае $\rho = 1$, коэффициент корреляции при этом равен – 0,9.

Проведен анализ методов определения и методик расчета коэффициента $M E_s$ – пересчета частотных параметров E_s -слоя при ВЗ в максимально-применимые частоты МПЧ E_s при наклонном падении. Для определения МПЧ E_s вводится поправочный коэффициент K , обусловленный различием технической обеспеченности ионозонда и радиолинии, и зависящий от выбора величины порога обнаружения E_s -сигналов по амплитуде. Выявлены изменения поправочного коэффициента от типа E_s -слоя, при $(\rho E_s)_{\text{пор}} = -30$ дБ поправочный коэффициент K для E_s -слоя c типа, равен 1,31; f типа – 2,15; l типа – 1,54; h типа – 1,38. Это объясняется не только геометрическими факторами, но и изменением структуры E_s -слоев в зависимости от высоты его расположения, а также от величины фоновой ионизации, что приводит к суточным изменениям поправочного коэффициента при фиксированных уровнях коэффициента отражения от слоя E_s . Изменения коэффициента K в течение суток значительны, так на трассе Москва-Казань его величина от ночи ко дню уменьшается в 1,3 раза (см. рис.8).

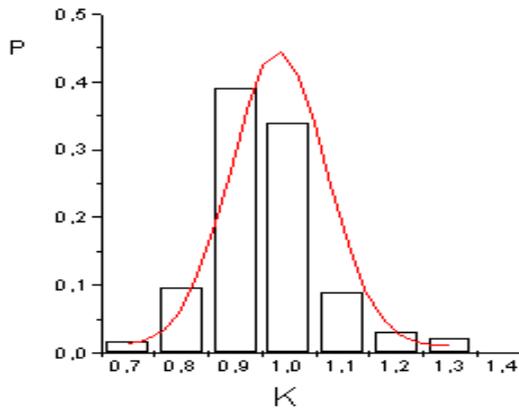


Рис. 9. Плотность распределения поправочных коэффициентов K , столбики – эксперимент, линия – расчет.

В том случае, когда чувствительность ионосферной станции и радиолинии близки, значения коэффициента K не должны существенно отличаться от единицы. Это положение проверялось при зондировании на скользящей частоте на трассе Москва-Казань. Получено, что при примерно равной энергетике станций ВЗ и НЗ экспериментальное распределение коэффициента K (см. рис.9) со среднеквадратичным отклонением, равным 0,14, совпадает с расчетным, полученным имитационным моделированием на основе облачной модели слоя, с параметрами, полученными из временных вариаций частоты $f_b E_s$.

Проведен сравнительный анализ экспериментальной зависимости $\rho E_s(f)$, полученной на статистической основе, с расчетными $\rho(f)$ для различных теоретических моделей слоя E_s . Показано, что при уровне ниже –30 дБ наиболее близкие соответствия наблюдаются для градиентного и рассеивающего слоя E_s .

В седьмой главе диссертации разрабатываются алгоритмы и проводится статистическое моделирование радиоканала при наличии слоя E_s . Проводится анализ эмпирических моделей вероятностных характеристик параметров слоя E_s , а также

характеристик Es-сигналов. Для определения характеристик радиоканала необходимо знание закона распределения частотных параметров. Проведен сравнительный анализ экспериментальных распределений величины f_oEs и наиболее употребляемых гипотетических законов распределения, в результате которого показано, что ни один из них не может описать все наблюдаемые изменения в экспериментальных распределениях. Поэтому, при прогнозе условий распространения радиоволн, вместо модельных описаний распределения частотных параметров в центре трассы, возможно использование распределений для экспериментального аналога. Для его нахождения из ионосферной базы данных необходимо задаться широтой и долготой центра трассы, количеством дней от начала года, параметрами солнечной и геомагнитной активности.

Строится алгоритм статистического моделирования радиоканала при наличии слоя Es для определения распределений уровня Es-сигналов на радиоперекрестках и максимально- применимых частот слоя Es на односкачковых среднеширотных трассах с учетом их технической оснащённости. Расчет амплитуды Es-сигналов U производится на основе экспериментального описания $\rho Es(f_{экр}, f_oEs, f_oE)$ и последующего учета поглощения в нижележащей ионосфере. Вероятность появления Es-сигналов PEs на радиоперекрестке находится при условии, что расчетная амплитуда Es-сигнала U превысит значение $U_{пор}$. Определение максимально-применимых частот для слоя Es производится в виде

$$МПЧ-Es = \frac{(0,58 - \lg(\rho Es_{пор})) \cdot \sqrt{f_oEs^2 - f_oE^2} \cdot \sec(\varphi)}{1,57},$$

где φ - угол падения волны на слой Es.

Проведено испытание алгоритмов статистического моделирования и показана их работоспособность при определении условий распространения радиоволн при

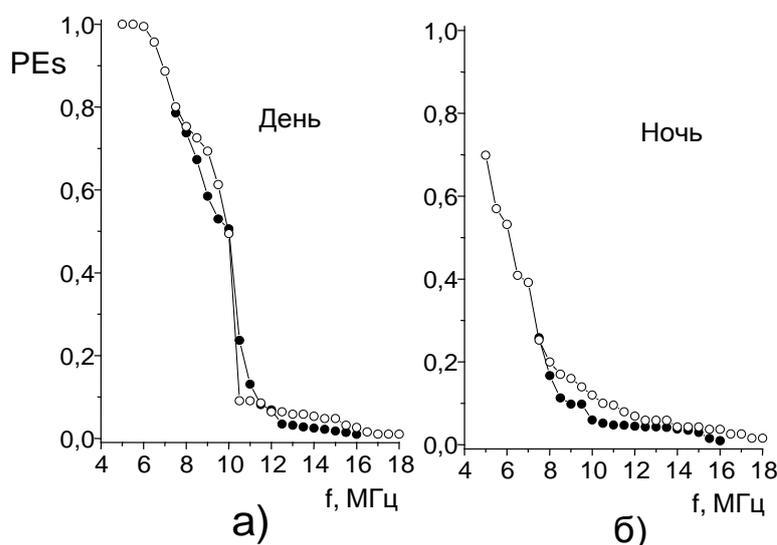


Рис.10. Сравнение экспериментального (точки) и расчетного (кружки) распределения величины МПЧ Es на трассе Москва-Казань для лета 1989г.: а – день, б- ночь.

наличии слоя Es в декаметровом и метровом диапазонах волн. Расчет распределений ρEs для радиоперекрестка Москва-Казань при $f=15$ МГц для лета 1983г. и сравнение их с экспериментальными показало их хорошее соответствие, различия медианных значений ρEs не превышают 10 дБ. Различия расчетных значений вероятности появления Es-сигналов на радиоперекрестке и экспериментальных для трассы София-Прага при $f=40,5$ МГц не превышают 20%. Расчетные распределения МПЧ Es и экспериментальные

на трассе Москва-Казань для лета 1989г. при пороговом уровне сигнала –30 дБ по абсолютной величине не превышают 10% (см.рис.10).

По данным алгоритмам, в качестве примера, произведен расчет условий распространения радиоволн на трассе длиной 1000 км для летних среднеширотных условий, что позволяет произвести долгосрочный прогноз диапазона применимых частот и повысить надежность радиосвязи на трассе. Наблюдаются суточные изменения диапазона частот с устойчивой радиосвязью (вероятность появления сигнала более 70%): для дневных условий он равен 5÷13 МГц, для ночных условий - 1÷7 МГц. Если вероятность отражения от слоя Es принять равной 30%, то диапазон применимых частот может достигать 10 МГц ночью и 18 МГц днем. Отметим, что за счет слоя Es диапазон рабочих частот возрастает на 2 или 4 МГц при расстояниях 500 и 2000 км соответственно.

Для оперативного прогноза условий распространения радиоволн при наличии слоя Es необходимо предсказывать частотные параметры слоя Es в центре трассы. Временные вариации параметра foEs существенно нестационарны, а распределение foEs отлично от нормального. Поэтому предлагается использовать модельное предположение о законе распределения foEs (далее переменная x):

$w(x,t) = f\left(\frac{x - \mu(t)}{\lambda(t)}\right)$, где $\mu(t)$ и $\lambda(t)$ – плавно изменяющиеся функции времени, для оценок

которых используются выборочные медиана и интерквартильный размах, с последующей нормализацией величины $\xi = \frac{x - \mu(t)}{\lambda(t)}$ с помощью нелинейного преобразования $F(x)$.

Оптимальный прогноз приведенной величины x , а также прогноз ожидаемого разброса значений строился на основе метода максимального правдоподобия. Проверка метода показала, что относительная среднеквадратичная величина ошибки предсказания составляет 0,84 (для 1 часа) и 0,97 (для двух часов). Это лучше, чем при применении методов линейного прогнозирования (величина ошибки, равна 0,98, для предсказания на 1 час). Однако прогнозирование частотных параметров по часовым значениям не дает положительного результата более чем на 2 часа вперед.

В заключении приведены основные результаты и выводы проведенных исследований.

1. Выполнены длительные экспериментальные исследования параметров слоя Es методами вертикального и наклонного зондирования на скользящей частоте, а также измерения энергетических характеристик Es-сигналов на фиксированных частотах с помощью специально разработанного ионосферного комплекса. Для этого создан программный пакет по обработке ионограмм в автоматическом и интерактивном режимах. Осуществлены комплексные наблюдения параметров слоя Es ионозондом, с разрешением по высоте, равным 2,5 км, и нейтрального ветра в нижней термосфере метеорным радаром, с разрешением, равным 3 км. Разработаны методики регистрации и обработки параметров Es-слоя и их совместного анализа с характеристиками нейтрального ветра.
2. Проанализирована неоднородная структура слоя Es при вертикальном зондировании ионосферы. Выявлен ряд особенностей сигналов, отраженных от слоя Es, по сравнению с сигналами, отраженными от регулярных слоев

ионосферы: повышение уровня сигнала до 15-20 дБ на частотах выше f_oE при возникновении слоя E_s в ионосфере; появление на амплитудно-частотных характеристиках интерференционных замираний при взаимодействии двух обыкновенных мод. Объяснение данных эффектов произведено на основе особенностей структуры слоя E_s . Произведены измерения коэффициента отражения E_s -слоя pE_s при вертикальном зондировании. Выявлены эффекты фокусировки и дефокусировки радиоволн неоднородностями слоя E_s с вариациями pE_s в диапазоне от 10 до -10 дБ. Впервые найдено описание спектра неоднородностей слоя E_s с учетом статистического спектра турбулентных движений в мезотермосфере. Выполненное описание способно объяснить вариации коэффициента отражения в диапазоне полупрозрачности слоя E_s .

3. На основе комплексных измерений динамики ветра в мезотермосфере и вариаций параметров слоя E_s в ионосфере и их анализа определены составляющие нейтрального ветра, характеристики которых необходимо учитывать при построении физической модели слоя E_s на основе теории ветрового сдвига. Установлено, что особенности суточно-сезонных вариаций частотных и высотных параметров слоя E_s можно объяснить сезонными изменениями в динамике ветра с учетом сложной структуры полусуточного прилива. Летний максимум интенсивности слоя E_s определяется юго-восточным направлением преобладающего ветра и восходящим направлением вертикального движения. Определены наиболее вероятные интервалы воздействия конвергирующих узлов конкретных мод полусуточного прилива на суточные вариации высоты образования слоя E_s . Впервые показано, что одним из факторов, влияющим на параметры слоя E_s , является уровень мезомасштабной турбулентности, повышение которого приводит к понижению интенсивности слоя E_s .
4. Определены закономерности влияния солнечной и геомагнитной активности на динамику ветра в мезотермосфере и параметры слоя E_s . Установлено, что характер этого влияния зависит от пространственного и временного масштабов ветровых процессов, высоты и сезона. Впервые показано, что при повышении уровня геомагнитной активности наблюдается торможение преобладающего зонального ветра и появление составляющей меридионального ветра, направленной на север; интенсивность мезомасштабной турбулентности в летний период увеличивается до 60% в интервале высот 104-110 км. Впервые обнаружены значительные долговременные вариации в частотных параметрах слоя E_s , которые не связаны с вариациями солнечной и геомагнитной активности, а могут быть вызваны долговременными вариациями характеристик мезотермосферы. Для частоты f_bE_s величина тренда на некоторых станциях достигает 0,08 МГц/год, а для полупрозрачности Δf_bE_s -0,07 МГц/год, для частоты f_oE_s знак тренда различен и зависит от географического положения исследовательской станции. Выявлено, что корреляция вероятности появления слоя E_s от солнечной активности до уровня 5 МГц положительная, а свыше – отрицательная и, по-видимому, зависит от типа ионов, из которых состоит слой. Обнаружены изменения реакции слоя E_s на геомагнитные возмущения в зависимости от сезона, уровня солнечной активности, а также интенсивности слоя в предыдущие сутки; преимущественно наблюдается уменьшение интенсивности слоя E_s в относительных единицах до 35% в день максимума геомагнитного

возмущения. Эффекты в параметрах слоя Es при повышении солнечной и геомагнитной активности объясняются изменениями в поведении нейтрального ветра.

5. Подтверждена концепция метеорологического контроля ионосферы и установлены эффекты тропосферной и стратосферной динамики, которые воздействуют на слой Es. Одним из механизмов влияния нижней атмосферы на слой Es определены планетарные волны, которые выделены в вариациях параметров слоя Es, с характерными периодами 4-6 и 14-16 суток и амплитудами 1-1,5 МГц. Изучены морфологические закономерности и впервые выявлены пространственно-временные вариации планетарных волн в параметрах слоя Es в зависимости от сезона, солнечной активности и долготы точки наблюдения. Обнаружена когерентность во временных вариациях частотных параметров слоя Es и интенсивности мезомасштабной турбулентности, а также изучены их фазовые соотношения в зависимости от сезона. Сопоставлены даты перестроек циркуляции в нижней термосфере и стратосфере с датами сезонного появления интенсивного слоя Es, что показало их соответствие с датами стратосферной перестройки. При этом, впервые обнаружены межгодовые вариации интенсивности слоя Es для летнего сезона в соответствии с датами перестройки циркуляции в стратосфере, для ранних сроков интенсивность повышается примерно в 1,5 раза.
6. Установлены и описаны закономерности энергетических характеристик Es-сигналов. Выявлены три дипазона частот с различным влиянием слоя Es на характер радиосвязи. Определено оптимальное значение порогового уровня сигнала, равное -45 дБ, работа на данном уровне позволяет значительно расширить диапазон применимых частот, так как при этом значение поправочного коэффициента к закону секанса повышается в 1,4 раза. На среднестатистической основе получена аналитическая зависимость коэффициента отражения ρ_{Es} при наклонном падении радиоволн от величин f_oE_s и f_oE , регистрируемых в центре трассы.
7. Построены алгоритмы статистического моделирования радиоканала при наличии слоя Es в целях решения задач определения распределений уровня Es-сигналов на радиолиниях и максимально-применимых частот для слоя Es на односкачковых среднеширотных трассах с учетом их технической оснащенности. Расчет по данным алгоритмам позволяет произвести долгосрочный прогноз диапазона применимых частот и повысить надежность радиосвязи на трассе до 1,5 раз в зависимости от рабочей частоты и времени суток.

Основные публикации автора по теме диссертации.

1. Минуллин Р.Г., Шерстюков О.Н. Коэффициент отражения от слоя Es на трассе Москва-Казань // Известия ВУЗ. Радиофизика. -1988. -Т.31, №6. -С.669-674.
2. Минуллин Р.Г., Назаренко В.И., Сюняев Р.З., Шерстюков О.Н. Круглосуточная радиосвязь на постоянной частоте декаметрового диапазона //Электросвязь.-1988. -N11. -С.14-17.

3. Минуллин Р.Г., Шерстюков О.Н. Отражающая способность слоя Es при наклонном зондировании //Геомagnetизм и аэрономия. -1988. -Т.28, N6. -С.965-968.
4. Акчурин А.Д., Зыков Е.Ю., Макаров Н.А., Минуллин Р.Г., Портнягин Ю.А., Шерстюков О.Н. Влияние динамики нижней термосферы на появление спорадического слоя E // Геомagnetизм и аэрономия. -1995. -Т.35, N 2. -С.123-129.
5. Акчурин А.Д., Зыков Е.Ю., Макаров Н.А., Минуллин Р.Г., Портнягин Ю.А., Шерстюков О.Н.. Влияние полусуточного прилива на вариации высоты спорадического слоя E // Геомagnetизм и аэрономия. -1996. -Т.36, N 3. -С.132-139.
6. Фахрутдинова А.Н., Шерстюков О.Н., Ясницкий Д.С. Воздействие нерегулярной составляющей термосферного ветра на плазменную частоту слоя Es // Геомagnetизм и аэрономия. -1997. -Т.37, N1. -С.179-185.
7. Шерстюков О.Н., Акчурин А.Д., Зыков Е.Ю. Взаимосвязь сроков весенней перестройки циркуляции и интенсивности спорадического слоя E // Геомagnetизм и аэрономия. -1997. -Т.37, N 5. -С.167-171.
8. Шерстюков О.Н., Минуллин Р.Г., Акчурин А.Д., Назаренко В.И., Сапаев А.Л., Зыков Е.Ю. Влияние спорадического слоя E на распространение метровых и дециметровых радиоволн на коротких трассах // Геомagnetизм и аэрономия. -2000. -Т.40, N.5. -С.69-74.
9. Шерстюков О.Н., Минуллин Р.Г., Акчурин А.Д., Зыков Е.Ю. Влияние крупномасштабной структуры слоя Es на предельные частоты при наклонном падении // Геомagnetизм и аэрономия. -2001. -Т.41, N.1. -С.227-232.
10. Шерстюков О.Н., Стенин Ю.М. Влияние турбулентных неоднородностей на полупрозрачность слоя Es // Геомagnetизм и аэрономия. -2002. -Т.42, N.1. -С.102-107.
11. Шерстюков О.Н., Рябченко Е.Ю. Синоптические колебания в параметрах среднеширотного спорадического слоя E // Геомagnetизм и аэрономия. -2004. -Т.44, N5. -С.661-667.
12. Максютин С.В., Шерстюков О.Н. Долгопериодные вариации параметров среднеширотного спорадического слоя E и их региональная изменчивость // Геомagnetизм и аэрономия. -2004. -Т.44, N5. -С.655-660.
13. Akchurin A.D., Sherstyukov O.N., Zykov E.Yu. Influence of the lower atmosphere dynamics on midlatitude sporadic E layer //Advances in Space Research. -1997. -V.20, N.6. -P.1309-1312.
14. Sherstyukov O.N., Akchurin A.D., Zykov E.Yu. Spring stratospheric circulation transition and sporadic layer E //Advances in Space Research. -1997. -V.20, N.6. -P.1313-1316.
15. Fahrutdinova A.N., Sherstyukov O.N., Yasnitsky D.S. The influence of the neutral lower thermosphere mesoscale turbulence on the midlatitude sporadic layer E //Advances in Space Research. -1997. -V.20, N.6. -P.1305-1307.
16. Akchurin A.D., Zykov E.Yu., Makarov N.A., Minullin R.G., Portnyagin Yu.A., Sherstyukov O.N. The influence of the semidiurnal tide on altitude variations of the sporadic E layer // Geomagnetism and Aeronomy International. -1998. -V.1, N.1. -P.89-95.

17. Fahrutdinova A.N., Sherstyukov O.N., Maksyutin S.V. The effect of geomagnetic activity on the upper mesosphere-lower thermosphere and on parameters of the Es-layer // *Advances in Space Research*, -1999. -V.24, N11. -P.1499-1502.
18. Fahrutdinova A.N., Sherstyukov O.N., Maksyutin S.V. Geomagnetic activity influence on the dynamics of the upper mesosphere and lower thermosphere // *Geomagnetism and Aeronomy International*. -2001. -V.2, N3. -P.201-208.
19. Maksyutin S.V., Fahrutdinova A.N., Sherstyukov O.N. Es layer and dynamics of neutral atmosphere during the periods of geomagnetic disturbances // *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* -2001. -V.63. -P.545-549.
20. Fahrutdinova A.N., Sherstyukov O.N., Yasnitsky D.S. The influence of the irregular movements at lower thermosphere on the ionospheric Es-layer by radiometeor observation in Kazan (56⁰N, 49⁰E) // *Phys. Chem. Earth*. -2001. -V.26, N.6. -P.445-448.
21. Maksyutin S.V, Sherstyukov O.N., Fahrutdinova A.N. Dependence of sporadic layer E and lower thermosphere dynamics on solar activity // *Advances in Space Research*, -2001. -V.27, N.6-7. -P.1265-1270.
22. Sherstyukov O.N., Maksyutin S.V Long time variations in sporadic-E layer parameters // *Environmental Radioecology and Applied Ecology*. -2000. -V.6, N3. -P.16-21.
23. Sherstyukov O.N., Ryabchenko E.Yu. Time-frequency analysis of data using Morlet wavelet // *Georesources*. -2001. -№2(5). -P.36-39.
24. Шерстюков О.Н. Фокусировка радиоволн при отражении от слоя Es // *Ионосферные исследования*. -М.:Изд. МГК, 1989. N46. -С.116-122.
25. Минуллин Р.Г., Шерстюков О.Н., Назаренко В.И., Меткий А.И., Сюняев Р.З., Акчурин А.Д. Цифровой ионосферный комплекс «Циклон» // *Ионосферные исследования*. -М.:Изд. МГК, 1989. N46. -С.109-115.
26. Minullin R.G., Nazarenko V.I., Sherstyukov O.N. New applied model of the mid-latitude sporadic E layer for calculating HF and VHF propagation probability // *Documents CCIR. Study Groups. Period 1990-1994*.
27. Akchyurin A.D., Minullin R.G., Nazarenko V.I., Sherstyukov O.N., Sapaev S.A., Zykov E.Yu. The ionospheric complex «Cyclon» // *Ionosonde networks and stations. World data centre-A for solar-terrestrial physics*. -Boulder, 1995. Report UAG-104. -P.35-36.
28. Minullin R.G., Sherstyukov O.N., Nazarenko V.I., Akchyurin A.D. The routine diagnosis of the ionosphere for the short-term forecast of HF and VHF propagation // *Ionosonde networks and stations. World data centre-A for solar-terrestrial physics*. -Boulder, 1995. Report UAG-104. -P.75-76.
29. Шерстюков О.Н., Минуллин Р.Г., Сапаев А.Л., Акчурин А.Д. Некоторые особенности отражения радиоволн от спорадического слоя E при вертикальном зондировании // *Ионосферные исследования*. -М.: 1997. N 50. -С.120-129.
30. Акчурин А.Д., Зыков Е.Ю., Макаров Н.А., Минуллин Р.Г., Портнягин Ю.А., Шерстюков О.Н. Быстрые нисходящие движения спорадического слоя E под действием полусуточного прилива // *Ионосферные исследования*. -М.: 1997. N 50. -С.154-167.
31. Зыков Е.Ю., Минуллин Р.Г., Шерстюков О.Н., Акчурин А.Д. Автоматическая обработка ионограмм в ионосферном комплексе «Циклон-10» // *Ионосферные исследования*. -М.: 1997. N 50. -С.232-243.

32. Шерстюков О.Н. Статистическое моделирование распространения метровых и декаметровых радиоволн при учете влияния спорадического слоя E // Прием и обработка сигналов в сложных информационных системах. -2001. -N.20. -С.3-9.
33. Рябченко Е.Ю., Шерстюков О.Н. Применение вейвлет-анализа для исследования временных вариаций ионосферных параметров // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия. –Казань. Сб. статей. 2001. -С.278-282.
34. Рябченко Е.Ю., Шерстюков О.Н. Определение характерных периодов колебаний в спектрально-неоднородных временных рядах метеорологических параметров. // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия. –Казань. Сб. статей. 2002. - С.291-296.
35. Шерстюков О.Н., Рябченко Е.Ю. Частотно-временной анализ синоптических колебаний в параметрах среднеширотного спорадического слоя E ионосферы // Исследовано в России. -177, -2002. -С.1956-1967. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/177.pdf>
36. Максютин С.В., Шерстюков О.Н. Долговременные изменения параметров среднеширотного спорадического слоя E // Исследовано в России. -009, -2003. - С.97-103. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/009.pdf>
37. Шерстюков О.Н. Спорадический слой E и эффекты его взаимодействия с динамикой нейтрального ветра // Прием и обработка сигналов в сложных информационных системах. -2003. -N.21. -С.3-28.
38. Бочкарев В.В., Петрова И.Р., Теплов В.Ю., Шерстюков О.Н. Исследование волновых процессов в термосфере методом наклонного зондирования // Исследовано в России. 2004. -007, -С.64-75. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/007.pdf>
39. Минуллин Р.Г., Шерстюков О.Н., Сапаев А.Л., Назаренко В.И., Акчурин А.Д., Зыков Е.Ю. Цифровой ионосферный комплекс «Циклон-9». Казанский ун-т.-Казань, 1994. Рус.-Деп. в ВИНТИ. N 518-B94. 17.06.94. 22с.
40. Максютин С.В., Шерстюков О.Н. Пространственная аппроксимация ионосферных параметров методом мультиквадрик. Казанский ун-т.-Казань, 1996. Рус.-Деп. в ВИНТИ. 06.12.96. N3538-B96. 16с.
41. Фахрутдинова А.Н., Шерстюков О.Н., Максютин С.В. Влияние геомагнитной активности на динамику нижней термосферы. Казанский ун-т.-Казань, 1998. Рус.-Деп. в ВИНТИ. 07.07.98. N2123-B98, 24с.
42. Шерстюков О.Н., Сапаев А.Л. Влияние турбулентных неоднородностей на частотные параметры слоя Es // X семинар по моделированию ионосферы. -М.: 1990, Тезисы докладов. -С.46.
43. Акчурин А.Д., Минуллин Р.Г., Назаренко В.И., Сапаев А.Л., Шерстюков О.Н. Некоторые особенности отражения радиоволн от слоя Es при вертикальном зондировании // XVII конф. по распространению радиоволн. -Ульяновск. 1993. Сб. докл. -С.53.
44. Sherstyukov O.N., Akchurin A.D., Nazarenko W.I., Zykov E.Yu. The changes of sporadic-E layer structure from vertical sounding // Annal. Geophys. -1995. -V.13, Supplement 3, Part 3. -P.649.
45. Sherstyukov O.N., Akchurin A.D. Diurnal seasonal regularities of sporadic-E occurrence and neutral wind // Annal. Geophys. -1995. V.13, Supplement 3, Part 3. - P.649.

46. Fahrutdinova A.N., Sherstyukov O.N., Yasnitsky D.S., Akchurin A.D. Influence of the lower thermosphere mesoscale turbulence on the ionospheric layer Es // XX General Assembly of EGS. Abstracts. -Germany, 1995. -P.644.
47. Zykov E.Yu., Sherstyukov O.N. The computing ionograms scaling results reliability analyser // XXVth General Assembly of the international union of radio science. URSI. Abstracts. -Lille. France. 1996. -P.399.
48. Шерстюков О.Н., Акчурин А.Д., Зыков Е.Ю. Тропосферно-стратосферная погода и среднеширотный слой Es // XVIII Всероссийская конф. по распространению радиоволн. -С.-Петербург, 1996. Т.2. Сб. докл. -С.517-518.
49. Фахрутдинова А.Н., Шерстюков О.Н., Ясницкий Д.С. Зависимость неоднородной структуры среднеширотного слоя Es от турбулентного режима нижней термосферы // XVIII Всероссийская конф. по распространению радиоволн. -С.-Петербург, 1996. Т.2. Сб. докл. -С.187-188.
50. Sherstyukov O.N., Maksyutin S.V. Affect of magnetic storm on a Sporadic-E layer // VIII Scientific Assembly of IAGA with ICMA and STP Symposia. -Uppsala, 1997. Abstracts. -P.134.
51. Акчурин А.Д., Зыков Е.Ю., Минуллин Р.Г., Шерстюков О.Н. Сезонная изменчивость интенсивности слоя Es в зависимости от общей циркуляции стратосферы и нижней мезосферы // XIX Всероссийская конф. по распространению радиоволн. -Казань, 1999. Сб. докл. -С.287-288.
52. Зыков Е.Ю., Шерстюков О.Н., Акчурин А.Д. Пространственная планетарная структура слоя Es // XIX Всероссийская конф. по распространению радиоволн. -Казань, 1999. Сб. докл. -С.85.
53. Maksyutin S.V., Sherstyukov O.N., Fahrutdinova A.N. Sporadic layer E and lower thermosphere dynamics depending on the solar activity // 33nd COSPAR Scientific Assembly, Abstracts. 2000. -P.403.
54. Sherstyukov O.N., Zykov E.Yu., Akchurin A.D. Planetary effects in parameters of the sporadic E - layer // 33nd COSPAR Scientific Assembly, Abstracts. 2000. -P.433.
55. Шерстюков О.Н. Моделирование распространения радиоволн при наличии слоя Es // XII Всеросс. школа-конф. по дифракции и распространению волн. Сб. докл. - М., 2001. -С.442-443.
56. Зыков Е.Ю., Шерстюков О.Н., Акчурин А.Д. Эффекты планетарных волн в параметрах спорадического среднеширотного слоя E // XX Всероссийская конф. по распространению радиоволн. -Н.-Новгород, 2002. Сб. докл. -С. 326-327.
57. Рябченко Е.Ю., Шерстюков О.Н. Исследование волновых закономерностей в спорадическом слое E методом вейвлет-анализа // Всероссийской конф. Фундаментальные исследования взаимодействия суши, океана и атмосферы. -М., 2002. Сб. докл. -С.99-100.
58. Шерстюков О.Н. Моделирование распространения дециметровых радиоволн при учете влияния слоя Es // XX Всероссийская конф. по распространению радиоволн. -Н.-Новгород, 2002. Сб. докл. -С.506-507.
59. Sherstyukov O.N., Maksyutin S.V. Regional variability of long-term variations of midlatitude E sporadic layer // Abstract Book of IUGG symposium. 2003. -P.B.27 (JSA01/08P/A12-007).

60. Sherstyukov O.N., Ryabchenko E.Yu. Spatio-temporal variations of sporadic E-layer synoptical oscillations in Europe // Workshop on Computational Physics. -St.-Peterburg, 2003. -P.44–45.
61. Sherstyukov O.N., Fahrutdinova A.N., Maksyutin S.V., Ryabchenko E.Yu., Zikov E. Yu. Influence of neutral wind dynamics of lower thermosphere on irregular ionospheric structure // 35nd COSPAR Scientific Assembly, Abstracts. 2004. C2.1-0072-04. Cospar04-A-02837. CD ROM.