

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Жбанков Геннадий Анатольевич

**РАЗРАБОТКА РАДИОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ
ИОНОСФЕРЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСЛОВИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
РАДИОВОЛН В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

1.3.4. Радиофизика (физико-математические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Научный консультант:
доктор физико-математических наук,
доцент Мальцева О.А.

Ростов-на-Дону – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список использованных обозначений и сокращений.....	5
Введение.....	6
Глава 1. Методика моделирования распространения радиоволн и параметров ионосферы	17
1.1. Расчеты траекторий радиоволн	17
1.1.1. Методика траекторно-амплитудных расчетов	17
1.1.2. Особенности решения лучевых уравнений для траекторий крутопадающих на ионосферу волн	21
1.1.4 Решение граничной задачи	28
1.1.5 Сравнение численных методов, используемых для решения задач распространения радиоволн	30
1.1.6. Сравнение метода характеристик с методом подталкивания упругой нити	40
1.2. Модели ионосферы.....	42
1.2.1. Современные глобальные модели ионосферы.....	42
1.2.2. Сравнение используемых моделей в конкретных условиях.....	45
1.2.3. Пространственно-временная модель неоднородностей ионосферы.....	47
1.2.4. Модель регулярного профиля ионосферы вдоль траектории распространения волны	49
1.3. Выводы	50
Глава 2. Методы обработки данных наземных ионозондов	52
2.1. Разработка методов расчетов N_h -профилей ионосферы из сложных ионограмм, полученных в результате системного радиозондирования.....	52
2.1.1 Метод восстановления профиля по нескольким базовым точкам ионограммы.....	53
2.1.2 Метод восстановления профиля по оцифрованной ионограмме вертикального зондирования	56
2.1.3 Метод восстановления $N(h)$ -профиля по экспериментальным данным внешнего зондирования	61
2.2. Программный комплекс «Viewer_DPS4» – инструмент обработки и анализа данных ионозонда DPS-4	61
2.2.1. Основные характеристики ионозонда DPS-4 и его режимов работы.....	62
2.2.2. Возможности программного комплекса «Viewer_DPS4» в режиме наблюдений..	64
2.2.3. Автоматизированная процедура расчета F-рассеяния по данным ионозонда DPS-465	
2.2.4. Особенности программного комплекса «Viewer_DPS4» в исследовательском режиме.....	69

2.3. Современные принципы ионосферного радиозондирования, реализованные в ДИНАЗОНДЕ-21	74
2.3.1. Принцип восстановления трехмерного распределения электронной концентрации ионосферы по ионограммам dynasonde-21	76
2.3.2. Влияние мелкомасштабных ионосферных неоднородностей на поведение сигналов радиозондирования	92
2.4. Выводы	99
Глава 3. Формулировка и обоснование принципа учета неоднородностей ионосферной плазмы на примере сложных ионограмм ИСЗ ИК-19	101
3.1. Основные принципы моделирования спутниковых ионограмм	104
3.2. Обнаружение и использование удаленных наклонных отражений от Земли	106
3.3. Неоднородности южного полушария	110
3.4. Особенности ионограмм в области главного ионосферного провала	115
3.5. Множественные следы в диапазоне 7–10 МГц	121
3.6. Моделирование неоднородной структуры низкоширотной ионосферы	125
3.7. Ионограммы внешнего зондирования при наличии мелкомасштабных неоднородностей	130
3.8. Выводы	132
Глава 4. Методика коррекции ионосферной модели на основе экспериментальных данных	133
4.1. Основные принципы коррекции ионосферной модели	133
4.2. Моделирование комплексного эксперимента по коррекции ионосферы	136
4.2.1. Постановка задачи и методика решения	136
4.2.2. Процесс восстановления трехмерной структуры ионосферы	138
4.2.3. Результаты моделирования	141
4.3. Использование данных сети наземных ионозондов для коррекции модели ионосферы	142
4.3.1. Моделирование процесса пространственной коррекции модели ионосферы	143
4.3.2. Результаты корректировки	144
4.3.3. Результаты корректировки для одной станции	146
4.4. Оценка эффективности метода по экспериментальным данным	147
4.4.1. Сравнение вертикальных профилей плазменной частоты	147
4.4.2. Оценка эффективности метода по данным ВЗ и НЗ на трассе Москва – Ростов	149
4.4.3. Сравнение экспериментальных ионограмм наклонного зондирования с модельными для трасс различной протяженности.	151
4.5. Выводы	158

Глава 5. Разработка методов трансionoсферного зондирования и комплексного исследования ионосферы.....	160
5.1. Общие положения	161
5.2. Трансионoсферное радиозондирование – метод диагностики наличия ионосферных неоднородностей	162
5.2.1. Результаты моделирования одиночных ионограмм	163
5.2.2. Оценка неоднородностей по серии последовательных ионограмм ТИЗ.	168
5.2.3. Общий случай расположения объектов.....	170
5.3. Диагностика ионосферы с использованием двух КА.	171
5.3.1. На основе приемника на МКС и бортового ионозонда на КА «Прогресс-М»	171
5.3.2. Трансионoсферное радиозондирование в Арктике в присутствии нескольких бортовых ионозондов на разновысоких орбитах	176
5.4. Влияние ионосферы на точность работы спутниковых навигационных систем	179
5.4.1. Среда распространения и методика расчетов	180
5.4.2. Моделирование определения положения по данным навигационных спутников.....	183
5.5. Выводы	188
Глава 6. Использование полного электронного содержания для определения состояния ионосферы.....	190
6.1. Результаты тестирования моделей группы IRI и их адаптация к экспериментальным данным foF2 и TЕС	190
6.2. Краткие результаты работы [34]	200
6.3. Результаты после публикации работы [34].....	211
6.4. Выводы.	224
Заключение	226
ЛИТЕРАТУРА.....	230
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Особенности программно-аппаратного комплекса Диназонд-21.....	256

Список использованных обозначений и сокращений

- ДКВ (ДКМВ)– декаметровые волны (декаметровый диапазон);
- КВ – короткие волны (коротковолновой диапазон);
- ИСЗ – искусственный спутник Земли;
- ТЕС (ПЭС) – полное электронное содержание ионосферы;
- ВЗ – вертикальное зондирование;
- ВнЗ – возвратно-наклонное зондирование;
- НЗ – наклонное зондирование;
- ТИЗ – транзионосферное зондирование;
- ОТИЗ – обратное транзионосферное зондирование;
- МРП – метод многочастотного радиопросвечивания;
- ВВ – волновые возмущения;
- ПИВ – перемещающиеся ионосферные возмущения;
- АГВ – акустико-гравитационные волны;
- КА – космический аппарат;
- МПЧ – максимально применимая частота;
- НПЧ – наименьшая применимая частота.
- hmF2 – высота максимума электронной концентрации слоя F2;
- foF2 – критическая частота слоя F2 для обыкновенной компоненты;
- hmE – высота максимума электронной концентрации слоя E;
- foE – критическая частота слоя E для обыкновенной компоненты;
- f_N , ω_0 – плазменная частота ионосферы;
- N(h)-профиль – распределение электронной концентрации.
- f_H – гирочастота электронов;
- $\nu_{эфф}$ – эффективная частота соударений электронов.

Введение

Актуальность темы исследования

Радиоволны коротковолнового (КВ) диапазона играют большую роль в различных сферах деятельности современного общества – радиосвязь, гражданское информационное вещание, навигация, пеленгация и т.д. Их надежность напрямую связана с состоянием околоземной ионосферной плазмы Земли.

Многочисленные экспериментальные исследования показали, что ионосфера характеризуется развитой неоднородной структурой в области масштабов порядка 1-1000 км [1-10]. Совместное действие волновых возмущений и хаотических неоднородностей ионизации искажает поверхности равной электронной концентрации. Естественно, это сильно сказывается на свойствах отраженных от ионосферы радиосигналов. Одним хорошо известным следствием является фединг в ионосферных каналах радиосвязи. Второе, не менее очевидное, – наличие бликов на искривленной поверхности ионосферного "зеркала", или многолучевость отраженных от ионосферы радиосигналов. Явление F-рассеяния сигналов напрямую связано с мелкомасштабными неоднородностями. В дальнейшем нас будут интересовать неоднородности, находящиеся на высотах слоев E и F ионосферы (примерно 80-500 км). На распределение электронной концентрации в этих случаях оказывают влияние локальные процессы, носящие случайный характер. К таким процессам относятся атмосферная турбулентность, плазменная неустойчивость, динамическое влияние нижележащих слоев атмосферы, акустико-гравитационные волны и т.п.

Классификацию ионосферных неоднородностей по масштабам можно основать на различии основных механизмов взаимодействия неоднородностей разных масштабов с радиоволнами дециметрового диапазона. Для мелкомасштабных (менее 5-10 км) неоднородностей основным механизмом воздействия является рассеяние радиоволн. Граничный масштаб 5-10 км соответствует размеру первой зоны Френеля. Неоднородности с масштабами 10-100 км будем называть среднемасштабными. Они приводят к многолучевости сигналов вертикального зондирования и связанным с ней эффектам. Более крупномасштабные неоднородности, как правило, не искажают лучевую структуру сигнала, но, как и среднемасштабные, порождают фокусировку-дефокусировку и плавное изменение углов прихода. Граница между среднемасштабными и крупномасштабными неоднородностями может колебаться в интервале 100-200 км.

Основным средством изучения ионосферы являются ионозонды как наземного, так и космического базирования. Основным средством изучения ионосферы являются ионозонды как наземного, так и космического базирования, которые входят в систему глобального

мониторинга ионосферы, использующую различные типы зондирования (вертикальное, наклонное, внешнее, трансionoсферное), показанные на рисунке В.1.

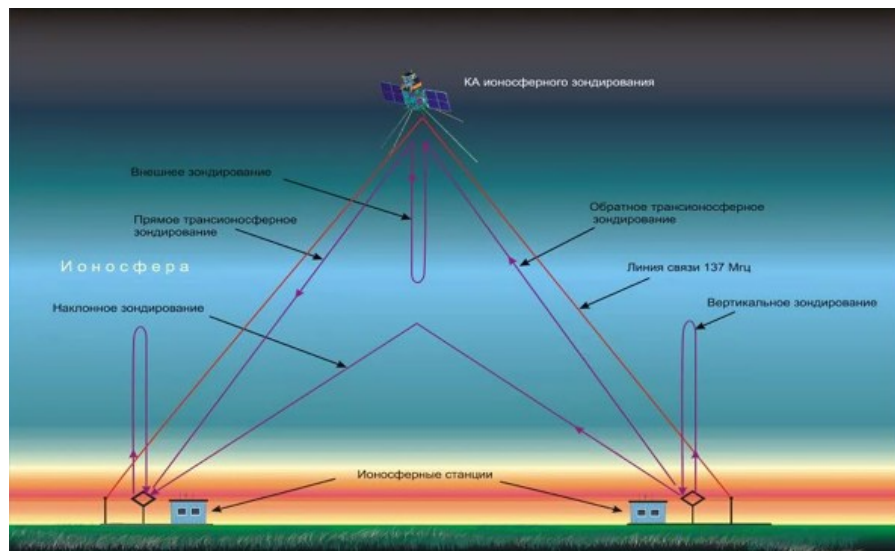


Рис. В.1 - Различные типы зондирования, используемые для диагностики ионосферы.

Современные ионозонды, такие как DPS-4, Dinasonde-21, «Томион», «Авгур-Д» и другие, могут определять не только действующее расстояние отраженных лучей, но и их поляризацию, углы прихода, ослабление, доплеровскую задержку [11-15]. Это предоставляет возможность определять кроме вертикального профиля электронной концентрации также и другие ионосферные параметры – наличие и размеры неоднородностей, градиент электронной концентрации, скорость дрейфа и др. Поэтому важное значение приобрели методы, позволяющие интерпретировать полученные результаты с использованием дополнительных данных. Особенно это касается ионограмм сложного вида, к которым относятся ионограммы вертикального, наклонного, спутникового зондирования, трансionoграммы. Такие методы основываются на численном моделировании, возможности которого увеличиваются с развитием вычислительной техники.

Это указывает на важную роль исследования воздействия неоднородной структуры ионосферы на радиосигналы на основе численного моделирования. Но прямое решение волнового уравнения распространения радиоволн в такой среде наталкивается на непреодолимые трудности.

Расчеты распространения радиоволн в ионосфере аналитическими или квазианалитическими методами возможны только для небольшого числа случаев, когда ионосферу можно заменить крайне упрощенными моделями и пренебречь влиянием магнитного поля и ее неоднородной структурой [16]. Однако решаемые в настоящее время научные и практические задачи требуют максимального приближения модели к реальным условиям.

Наилучшим приближением для решения волнового уравнения в случае ионосферы

является метод геометрической оптики. Он занимает среди других приближенных методов решения волновых уравнений особое место. С одной стороны, это обусловлено тем, что он позволяет в ряде случаев получить аналитическое решение, когда при аналогичных условиях могут быть решены и исходные уравнения Максвелла. Это дает возможность осуществить детальную проверку метода. С другой стороны, этот подход приводит к решению уравнения эйконала, которое относится к классу уравнений Гамильтона-Якоби. Тогда в теории распространения ДКВ в ионосферной плазме могут быть применены методы, развитые в классической механике [17,18].

Было разработано несколько методов для амплитудно-траекторных расчетов в возмущенной среде в этом приближении: метод Смита [19], метод рефракционного интеграла [20], метод характеристик [21,22]. Наиболее последовательно и эффективно в рамках геометрикооптического приближения задача нахождения траекторных и энергетических характеристик в данном случае реализуется на пути решения расширенной системы характеристических уравнений (метод характеристик).

Другим эффектом развития техники зондирования и систем связи стало появление глобальной сети ионозондов, связанных общим банком данных. Благодаря этому можно одновременно получать результаты зондирования в разных точках и строить глобальные карты ионосферных параметров, которые можно использовать для адаптации эмпирических моделей в задачах КВ радиосвязи, загоризонтной связи и др. [23, 24]. Такая адаптация является одним из вариантов задач коррекции ионосферных условий распространения радиоволн, которым уделяется большое внимание (например, [25-32]). Однако, пока они используются в региональном варианте, т.е. для моделей, построенных по локальным данным [25, 26, 29]. В работе [27] используются только данные о полном электронном содержании ТЕС в соответствии с английской аббревиатурой (total electron content) этого параметра. В [28, 30] исследуется возможность уточнения лишь значений критической частоты $foF2$.

ТЕС ионосферы является сравнительно новым параметром ионосферы, определяемым, как число электронов в столбе площадью 1 м^2 вдоль траектории луча от передатчика на спутнике к приемнику на Земле, и измеряемым по разности групповых задержек и/или разности фаз на двух частотах в диапазоне ГГц. Возможности его использования обозначили новую эру в ионосферных исследованиях [33]. Наиболее полно связь ТЕС с условиями распространения радиоволн представлена в [34]. В одной из последних статей указывается на большие перспективы использования КВ-зондирования ионосферы для функционирования различных систем связи [35].

Таким образом, приведенный краткий обзор указывает на то, что решение

многочисленных проблем, связанных с диагностикой ионосферной плазмы, имеет первостепенное значение. Поскольку эти проблемы относятся ко всем типам зондирования, они приводят к общей **проблеме создания единой системы диагностики ионосферы, учитывающей неоднородности**. Разработанные в диссертации методы диагностики являются важными технологическими решениями, которые уже осуществляются в станциях дальней радиолокации, при эксплуатации ионозондов Dinasonde-21 и «Томион», в работе космической группировки «Ионосфера-М» с 4 спутниковыми ионозондами, запущенной в 2024-2025, и находят свое применение в разработке идеологии российской орбитальной станции РОС, запуск которой планируется на 2030 год.

Цели и задачи исследования.

Целью диссертационного исследования является разработка методов диагностики ионосферы для совокупности всех возможных типов зондирования (вертикальное, наклонное, внешнее, транзионосферное) на основе единого подхода к моделированию распространения радиоволн, коррекции ионосферной модели, учету неоднородностей, использованию ТЕС для прогноза состояния ионосферы.

Для достижения цели исследования были поставлены и решены следующие **задачи**:

- исследование и определение наиболее эффективного численного алгоритма расчета характеристик распространения КВ-сигналов;
- решение лучевых уравнений в магнитоактивной среде для крутопадающих траекторий вблизи точки отражения;
- тестирование современных моделей ионосферы по данным различных типов экспериментов для оценки возможности их использования в задачах диагностики среды;
- разработка новых методик и алгоритмов восстановления профилей электронной концентрации N_e в ионосфере с учетом особенностей системного радиозондирования по данным ионозондов различных типов;
- разработка принципов обработки и анализа данных ионозонда DPS-4 для автоматизированного расчета F рассеяния, их реализация в виде программного комплекса «Viewer_DPS4»;
- формулировка и обоснование принципа учета неоднородностей ионосферной плазмы на примере сложных ионограмм ИСЗ ИК-19 с привлечением программ траекторных расчетов и реконструкции пространственного распределения электронной концентрации;
- разработка методики коррекции глобальной модели ионосферы для соответствия экспериментальным данным различных типов ионосферных исследований;
- исследование на основе численного моделирования возможности применения

принципов трансionoсферного зондирования к диагностике ионосферы, в том числе возможных результатов использования ионозондов в комплексном эксперименте «Ионосфера-М»;

– анализ возможностей определения состояния ионосферы и ее параметров, связанных с использованием полного электронного содержания ТЕС.

Объекты исследования

Объектами исследования являются радиофизические методы диагностики ионосферы на основе численного моделирования распространения радиоволн КВ-диапазона с целью обеспечения информацией наземных и спутниковых систем связи.

Предметы исследования

Предметом исследования являются возможности диагностики ионосферы с помощью наземных и спутниковых систем как средства определения ее состояния и коррекции моделей ионосферы по экспериментальным данным.

Методы исследования

В данной работе используется комплексный подход, заключающийся с одной стороны в моделировании ионосферы как среды распространения, а с другой стороны – в разработке и сравнительном анализе различных численных методов расчета параметров распространения КВ-радиосигналов в неоднородной магнитоактивной среде. Исследования включают использование компьютерного моделирования и обработку экспериментальных данных. При этом использованы как теоретические методы (радиофизики, физики плазмы), так и статистические методы (теория вероятностей, теория случайных процессов).

Научные положения, выносимые на защиту

1. Разработанный комплекс обработки и анализа данных «Viewer_DPS4» позволяет получать и использовать параметры неоднородностей нижней ионосферы, связанные с F-рассеянием сигналов. Его преимущество состоит в автоматизированном расчете этих параметров и возможности детального анализа отраженных эхо-сигналов.

2. Созданный на основе программного обеспечения NeXtYZ инструмент dynasonde-21 реализован в виде реальных ионозондов в международном масштабе и позволяет получить 3-х мерные структуры нижней ионосферы.
3. Метод корректировки ионосферных моделей на основе коэффициента коррекции с использованием данных всех типов ионосферного зондирования позволяет максимально приблизить ионосферную модель к реальной ситуации и существенно увеличить пространственную область его применения.
4. Полученные в рамках обработки и интерпретации данных внешнего зондирования результаты позволили определить параметры верхней ионосферы, которые нельзя получить при зондировании с земли, обнаружить неизвестные следы на ионограммах, получить статистику наблюдений неоднородностей.
5. Результаты, полученные при моделировании ионограмм транзионосферного зондирования, выявили возможности использования нескольких типов орбит спутников, позволили предложить несколько схем экспериментов, в том числе ТИЗ и ОТИЗ.
6. Предложенная корректировка модели ионосферы с использованием ТЕС и эмпирической медианы эквивалентной толщины позволяет определять f_oF2 и строить полный Nh -профиль ионосферы от ее начала до любой высоты спутников.

Научная новизна результатов исследования:

- разработана методика расчета траекторий КВ-радиоволн в ионосфере методом характеристик, позволяющая учесть особенность поведения крутопадающих волн в окрестности особой точки;
- разработаны новые методы восстановления высотных профилей электронной концентрации в ионосфере по данным наземных ионозондов вертикального зондирования;
- разработано оригинальное математическое обеспечение для ионозонда DINASONDE-21, отличающееся возможностью восстановления трехмерного Nh -профиля;
- создан инструмент автоматизированной обработки и анализа данных ионозонда DPS-4, позволяющий исследовать эффект F-рассеяния с определением параметров мелкомасштабных неоднородностей;
- разработана методика моделирования сложных спутниковых ионограмм, отличающаяся учетом неоднородностей;
- методы определения параметров ионосферы при транзионосферном зондировании, отличающиеся использованием различных ионозондов;
- использование полного электронного содержания для определения критических и

максимальных применимых частот на КВ-трассах через расчет эмпирической толщины ионосферы $t(\text{obs})$ более эффективно по сравнению с использованием t различных моделей.

Практическая значимость заключается в разработке:

- методики расчета траекторий КВ-радиоволн в окрестности особой точки;
- новых методов определения $N(h)$ -профилей в ионосфере по данным наземных и спутниковых ионозондов;
- алгоритмизации и автоматизации процесса определения параметров ионосферы при F-рассеянии;
- метода построения сложных спутниковых ионограмм со следами неоднородных структур;
- коррекции глобальной модели ионосферы по экспериментальным данным различных типов ионосферных измерений с использованием «коэффициента коррекции» для основных ионосферных параметров;
- принципа использования полного электронного содержания для оценки состояния ионосферы.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности 1.3.4 – «Радиофизика»

Диссертационная работа посвящена развитию теории и практики мониторинга ионосферы, включающему разработку методов ее диагностики. Область диссертационного исследования включает разработку методик использования результатов радиозондирования для диагностики ионосферы.

Указанная область исследования соответствует формуле специальности 1.3.4 – «Радиофизика», а именно пункту 5 – «Разработка научных основ и принципов активной и пассивной дистанционной диагностики окружающей среды, основанных на современных методах решения обратных задач. Создание систем дистанционного мониторинга гео-, гидросферы, ионосферы, магнитосферы и атмосферы. Радиоастрономические исследования ближнего и дальнего космического пространства».

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов, полученных в диссертации, обеспечивается строгой математической постановкой решаемых задач, адекватностью используемых моделей среды распространения реальной ионосфере, согласованностью полученных результатов с

экспериментальными данными, а также совпадением полученных результатов в предельных случаях с результатами, полученными другими авторами.

Внедрение результатов работы

Результаты работы включены:

- в отчеты научно-исследовательского института физики ЮФУ:
 - по научно-исследовательской работе «Принципы обеспечения ионосферной информацией наземных и космических систем нового поколения» (заключительный) БЧ№3.9696.2017/8.9, Ростов-на-Дону, 2019, 90 с.
 - по научно-исследовательской работе «Исследование отклика околоземной плазмы на геомагнитные возмущения методами спутникового и наземного радиозондирования» (итоговый) 2.5836.2011, Ростов-на-Дону, 2013, 48 с.
 - по научно-исследовательской работе «Исследование эффектов внутренних гравитационных волн в ионосфере» (заключительный), Ростов-на-Дону, 2011, 27 с.
- в отчете по научно-исследовательской работе «Эврика-2016-ЮФУ»,
- в практической деятельности АО «РТИС ВКО»,
- в программном комплексе ионозондов системы DINASONDE-21.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 52 всероссийских и международных конференциях, в том числе:

- General Assembly of URSI (Netherlands, 2002; USA, 2008; China, 2014);
- RF Interactions Workshop, (Santa Fe, New Mexico, 2004);
- International Ionospheric Effects Symposium (2005, 2011);
- URSI National Radio Science Meeting (USA, 2008);
- COSPAR Scientific Assembly (India, 2012; Russia, 2014);
- International Reference Ionosphere Workshop (Poland, 2013; Cyprus, 2019);
- WSEAS International Conference on Wireless and Mobile Communication Systems (France, 2013);
- International Beacon Satellite Symposium BSS2013 (UK, 2013);
- Progress in the Electromagnetics Research Symposium (China, 2014);
- URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (Korea, 2016);
- URSI Atlantic Radio Science Meeting (Meloneras, 2018);
- International Conference “Problems of Geocosmos” (St. Petersburg, 2012, 2014);

- международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн. ИРЭМВ». (Таганрог-Дивноморское, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019, 2021);
- международной конференции «Волны в неоднородных средах и интегрируемые системы» (Калининград, 2019).
- Apatity Seminar “Physics of Auroral Phenomena” (Apatity, 2010, 2011, 2014, 2015, 2016, 2019, 2021, 2023, 2024);
- всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн» (2008, 2011, 2014, 2019, 2021, 2023);
- всероссийском симпозиуме «Радиолокационное исследование природных сред», (ВКА имени А.Ф.Можайского, 2009, 2011, 2019);
- международная конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" (Москва, ИКИ РАН, 2013, 2016, 2022);
- конференция "Физика плазмы в солнечной системе" (Москва, ИКИ, 2013, 2016, 2023);
- международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» («Радиоинфоком», Москва, МИРЭА, 2024, 2025).

Публикации

Всего по теме диссертации опубликовано 80 работ, из них 31 – в изданиях, индексируемых в базе данных SCOPUS, 9 работ – в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора состоял в проведении теоретического рассмотрения, создании алгоритмов и программных комплексов, численного моделирования, обработке экспериментальных данных и анализе результатов, обсуждении совместных публикаций. Все представленные в диссертации результаты получены соискателем лично или при его непосредственном участии. В совместных публикациях автор имел независимый вклад, связанный с обработкой и интерпретацией предоставляемых экспериментальных данных. В диссертации представлены именно соответствующие вклады.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 280 страниц машинописного текста, содержит 161 рисунок, 11 таблиц и список литературы из 285

наименований.

Введение посвящено анализу современного состояния и перспективных направлений развития методов диагностики ионосферы с использованием численного моделирования. Показывается актуальность и значимость проводимого исследования, определяются цели, задачи и методы исследования.

Первая глава содержит подробное описание метода численного моделирования распространения КВ-радиоволн в неоднородной магнитоактивной ионосфере на основе метода характеристик. Основное внимание уделено алгоритмам расчета траекторий. Особо выделен случай решения уравнений для крутопадающих на ионосферу лучей. Детально описано решение граничной задачи. Особое внимание уделено численным методам интегрирования соответствующих уравнений. Показано, что в зависимости от поставленных начальных условий желательно использовать различные схемы решения. Выводятся общие формулы, используемые для задания ионосферных неоднородностей в рамках численного моделирования.

Во **второй главе** рассматривается задача восстановления реального высотного профиля электронной концентрации по данным ионозонда (наземного или спутникового). Предложены три метода восстановления $N(h)$ -профилей, которые можно использовать в качестве автоматизированной процедуры с целью обеспечения более высокой точности, чем у традиционных методов. Большое внимание уделено разработке принципа обработки и анализа данных с учетом F-рассеяния и автоматизации этого учета программным комплексом «Viewer_DPS4». Проведен детальный анализ отраженных эхо-сигналов. Детально представлены принципы построения, алгоритмы, результаты функционирования нового инструмента dynasonde-21 и соответствующая программа NeXtYZ. Показано, что алгоритм NeXtYZ является более устойчивым к плохим или недостаточным данным и его использование позволяет наиболее точно определять не только трехмерную структуру распределения электронной концентрации, но и погрешность на каждом шаге процедуры и, в целом, доплеровские сдвиги и скорости дрейфа. Исследуется, как влияют мелкомасштабные неоднородности на форму ионограмм вертикального зондирования таких ионозондов, как DPS-4 и dynasonde-21.

В **третьей главе** на основе численного моделирования разработана схема интерпретации сложных ионограмм спутника Интеркосмос-19, модифицированных влиянием неоднородностей ионосферной плазмы. Это позволило обнаружить на ионограммах внешнего зондирования такие ранее неизвестные следы, как наклонные отражения от Земли, задержанный нижний след, рассеянные и многократные следы, жемчужины, волноводные следы. Разработанные методы траекторных расчетов и

моделирования позволили интерпретировать эти данные фактом присутствия в верхней ионосфере неоднородностей различных масштабов. Получена статистика наблюдений неоднородностей в зонах экваториальной аномалии, провала. Оценены размеры мелких и крупных неоднородностей. Подтверждена возможность волноводного распространения КВ в верхней ионосфере. В ряде случаев дана информация о механизмах возникновения неоднородностей.

В **четвертой главе** предложен метод коррекции на основе результатов комплексного зондирования ионосферы, позволяющий максимально приблизить ионосферную модель к реальной ситуации. Проверка его работоспособности, проведенная как для численного моделирования корректировки ионосферы над частью территории Европы, так и при сравнении экспериментальных и модельных наклонных ионограмм, дает практически точные результаты. Использование предложенной процедуры коррекции вместе с моделью IRI-2016 при обработке данных наклонного зондирования оказалось эффективным для трасс различной протяженности как в спокойных условиях, так и в период достаточно сильного возмущения.

В **пятой главе** предлагаются методы спутникового трансionoсферного зондирования (ТИЗ), обладающие большим разнообразием как по высотам орбит спутников, так и по расположению передающих и приемных систем. Основной задачей является разработка этих методов применительно к будущим экспериментам. Выявлены широкие диагностические возможности данного вида ионосферного зондирования. Показано, что наибольший эффект следует ожидать от совместного использования трансionoграмм и ионограмм вертикального и наклонного зондирования.

В **шестой главе** исследуются возможности использования полного электронного содержания ТЕС для определения состояния ионосферы. Показано, что ТЕС ионосферы позволяет выявлять климатологические особенности состояния ионосферы и описывать это состояние во время возмущений. Предложенный способ использования ТЕС позволяет увеличить точность определения критических и, соответственно, максимальных применимых частот по сравнению с современными эмпирическими моделями ионосферы. Результаты тестирования показали сильное различие между значениями экспериментальной медианы эквивалентной толщины ионосферы $\tau(\text{med})$ и значениями эквивалентной толщины современных эмпирических моделей (например, IRI, IRI-Plas, NeQuick), что позволило сделать вывод о важности использования $\tau(\text{med})$ для увеличения этой точности.

В **заключении** подводятся итог и приводятся наиболее значимые результаты работы.

Глава 1. Методика моделирования распространения радиоволн и параметров ионосферы

Современный уровень проведения экспериментов позволил выявить сложную структуру ионосферных неоднородностей в области масштабов порядка 1-1000 км, которая приводит к федингу в ионосферных каналах радиосвязи. Важнейшим искажением характеристик сигнала за счет неоднородностей является многолучевость [1, 2, 4-6]. Данная глава посвящена проблемам моделирования, связанным с учетом неоднородностей. К ним относится исследование эффектов влияния неоднородностей прежде всего на распространение сигналов. Прямое решение волнового уравнения в этом случае сталкивается с необходимостью его упрощения. При этом методика моделирования распространения радиоволн требует выбора метода траекторно-амплитудных расчетов лучей и его численной реализации. Другой проблемой является моделирование параметров ионосферы, необходимое для задания их пространственно-временного распределения.

Это определяет важность исследования эффектов влияния неоднородностей на распространение сигналов. Однако прямое решение волнового уравнения в этом случае сталкивается с необходимостью его упрощения. При этом методика моделирования распространения радиоволн требует выбора метода траекторно-амплитудных расчетов лучей и его численной реализации. А методика моделирования параметров ионосферы необходима для задания их пространственно-временного распределения.

В следующих разделах дается решение этих проблем.

1.1. Расчеты траекторий радиоволн

1.1.1. Методика траекторно-амплитудных расчетов

В случае ионосферы использование аналитических или квазианалитических приближений в расчетах распространения радиоволн возможно только для недопустимо упрощенных моделей ионосферы, которые не отвечают современным требованиям о максимальной близости модели к реальным условиям.

В данной работе используется метод геометрической оптики, поскольку в ряде случаев можно получить аналитическое решение и проверить правильность метода. Кроме того, возможно использовать решение уравнения эйконала [18, 21, 22].

Одним из важных преимуществ геооптического приближения является возможность его применения в магнитоактивной неоднородной нестационарной среде,

включающей различные типы неоднородных структур, присутствующих в ионосфере [1-10, 36-45]

Необходимо отметить, что существует несколько реализаций такого подхода: метод Смита [19], метод рефракционного интеграла [20], метод характеристик [21, 22], метод подталкивания упругой нити [46]. Поскольку наиболее эффективным является метод характеристик с расширенной системой характеристических уравнений [21, 22], он реализуется в данной работе.

В общем случае расширенная система характеристических уравнений для описания распространения радиоволны вблизи Земли в сферической системе координат записывается следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\varphi}{d\tau} &= \frac{1}{r \cdot \sin \theta} \left\{ k_\varphi - \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial k_\varphi} \right\}; \\
 \frac{d\theta}{d\tau} &= \frac{1}{r} \left\{ k_\theta - \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial k_\theta} \right\}; \\
 \frac{dr}{d\tau} &= k_r - \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial k_r}; \\
 \frac{dk_\varphi}{d\tau} &= \frac{1}{r \cdot \sin \theta} \left\{ \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial \varphi} - k_\varphi \sin \theta \frac{dr}{d\tau} - r k_\varphi \cos \theta \frac{d\theta}{d\tau} \right\}; \\
 \frac{dk_\theta}{d\tau} &= \frac{1}{r} \left\{ \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial \theta} - k_\theta \frac{dr}{d\tau} + r k_\varphi \cos \theta \frac{d\varphi}{d\tau} \right\}; \\
 \frac{dk_r}{d\tau} &= \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial r} + k_\theta \frac{d\theta}{d\tau} + k_\varphi \sin \theta \frac{d\varphi}{d\tau}; \\
 \frac{d}{d\tau} \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} &= \frac{1}{r \cdot \sin \theta} \left\{ \frac{\partial k_\varphi}{\partial \xi} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 n^2}{\partial k_\varphi \partial k_i} \frac{\partial k_i}{\partial \xi} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 n^2}{\partial k_\varphi \partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial \xi} - \left(\frac{\partial r}{\partial \xi} \sin \theta + r \cdot \cos \theta \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right) \frac{d\varphi}{d\tau} \right\}; \\
 \frac{d}{d\tau} \frac{\partial \theta}{\partial \xi} &= \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial k_\theta}{\partial \xi} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 n^2}{\partial k_\theta \partial k_i} \frac{\partial k_i}{\partial \xi} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 n^2}{\partial k_\theta \partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial \xi} - \frac{\partial r}{\partial \xi} \frac{d\theta}{d\tau} \right\}; \\
 \frac{d}{d\tau} \frac{\partial r}{\partial \xi} &= \frac{\partial k_r}{\partial \xi} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 n^2}{\partial k_r \partial k_i} \frac{\partial k_i}{\partial \xi} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 n^2}{\partial k_r \partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial \xi}; \\
 \frac{d}{d\tau} \frac{\partial k_\varphi}{\partial \xi} &= \frac{1}{r \cdot \sin \theta} \left\{ \frac{1}{2} \frac{\partial^2 n^2}{\partial \varphi \partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 n^2}{\partial \varphi \partial k_i} \frac{\partial k_i}{\partial \xi} - \sin \theta \frac{\partial k_\varphi}{\partial \xi} \frac{dr}{d\tau} - \right. \\
 &\quad \left. - k_\varphi \cdot \cos \theta \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \frac{dr}{d\tau} - k_\varphi \cdot \sin \theta \frac{d}{d\tau} \frac{\partial r}{\partial \xi} + r k_\varphi \cdot \sin \theta \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \frac{d\theta}{d\tau} - r \cdot \cos \theta \frac{\partial k_\varphi}{\partial \xi} \frac{d\theta}{d\tau} - \right. \\
 &\quad \left. - r k_\varphi \cdot \cos \theta \frac{d}{d\tau} \frac{\partial \theta}{\partial \xi} - \left(\sin \theta \frac{\partial r}{\partial \xi} + r \cdot \cos \theta \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right) \frac{dk_\varphi}{d\tau} \right\};
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\tau} \frac{\partial k_r}{\partial \xi} = & \frac{1}{2} \frac{\partial^2 n^2}{\partial r \partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 n^2}{\partial r \partial k_i} \frac{\partial k_i}{\partial \xi} + \frac{\partial k_\theta}{\partial \xi} \frac{d\theta}{d\tau} + \\ & + k_\theta \frac{d}{d\tau} \frac{\partial \theta}{\partial \xi} + k_\varphi \cdot \cos \theta \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \frac{d\varphi}{d\tau} + \sin \theta \frac{\partial k_\varphi}{\partial \xi} \frac{d\varphi}{d\tau} + k_\varphi \cdot \sin \theta \frac{d}{d\tau} \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \Bigg\}. \end{aligned}$$

Здесь используются сферические координаты луча (φ, θ, r) , которые обозначают: φ – угол, определяющий ориентацию $\mathbf{r}$ относительно оси OX в плоскости OXY , θ – угол, отсчитываемый от оси OZ к радиусу-вектору луча $\mathbf{r}$, r – длина радиуса-вектора, векторы: $\mathbf{k} = (k_\varphi, k_\theta, k_r)$ – волновой вектор, $\mathbf{h}$ – единичный вектор геомагнитного поля Земли. Для задания начальных значений этих векторов используются: для $\mathbf{k}$ азимутальный угол α_0 и угол места Δ_0 , для $\mathbf{h}$ используются гирочастота f_h , магнитное наклонение I , магнитное склонение D .

Для фигурирующих в уравнениях производных, в общем случае переменного магнитного поля Земли, справедливы равенства:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n^2}{\partial x_i} &= \frac{\partial n^2}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial x_i} + \frac{\partial n^2}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial x_i} + \frac{\partial n^2}{\partial \cos \eta} \frac{\partial \cos \eta}{\partial x_i}; \\ \frac{\partial n^2}{\partial k_i} &= \frac{\partial n^2}{\partial \cos \eta} \frac{1}{k} \left(h_i - \frac{k_i}{k} \cos \eta \right); \\ \frac{\partial \cos \eta}{\partial x_i} &= \frac{1}{k} \left(k_\varphi \frac{\partial h_\varphi}{\partial x_i} + k_\theta \frac{\partial h_\theta}{\partial x_i} + k_r \frac{\partial h_r}{\partial x_i} \right); \end{aligned}$$

Здесь под повторяющимся индексом подразумевается (как это принято) суммирование. Сферические координаты точки и компоненты волнового вектора в суммах обозначены, соответственно, x_i, k_i , а компоненты магнитного поля h_i .

В любой точке земной поверхности с координатами $(\varphi_0, \theta_0, R_0)$ начальные условия для системы (1.1) для сферической системы могут быть заданы в виде:

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi_0; \\ \theta &= \theta_0; \\ r &= R_0; \\ k_\varphi &= \cos \Delta_0 \sin \alpha_0; \\ k_\theta &= -\cos \Delta_0 \cos \alpha_0; \\ k_r &= \sin \Delta_0; \end{aligned} \tag{1.2}$$

$$\frac{\partial x_i}{\partial \xi} = 0;$$

$$\frac{\partial k_i}{\partial \xi} = 0;$$

$$\frac{\partial k_\varphi}{\partial \alpha} = \cos \Delta_0 \cdot \cos \alpha_0;$$

$$\frac{\partial k_\theta}{\partial \alpha} = \cos \Delta_0 \cdot \sin \alpha_0;$$

$$\frac{\partial k_r}{\partial \alpha} = 0;$$

$$\frac{\partial k_\varphi}{\partial \Delta} = -\sin \Delta_0 \cdot \sin \alpha_0;$$

$$\frac{\partial k_\theta}{\partial \Delta} = \sin \Delta_0 \cdot \cos \alpha_0;$$

$$\frac{\partial k_r}{\partial \Delta} = \cos \Delta_0;$$

Система (1.1) описывает наиболее общий случай нахождения траектории радиоволн, максимально приближенный к реальной ситуации. Однако, на практике используются ее упрощенные варианты: приближение постоянного магнитного поля, описывающее в пределе изотропную среду, для которой учет О- и Х-компонент проводится введением частотных поправок; двумерный вариант при распространении в выделенной плоскости, достаточно точно работающий при наклонном распространении; приближение горизонтально-однородной среды.

Все это связано с несколькими объективными факторами, существовавшими до недавнего времени. Во-первых, расчет одиночной траектории в большинстве задач является лишь инструментом, используемым при решении более общей задачи (например, моделирование ионограмм вертикального и наклонного зондирования, задачи радиолокации, радиосвязи). В процессе ее решения требуется проводить вычисления большого набора траекторий (счет может идти на тысячи). В связи со сложностью правой части полученной системы дифференциальных уравнений, время одного расчета на существующей до недавнего времени вычислительной технике могло достигать нескольких минут, что неприемлемо. Однако сейчас, в связи с бурным ростом производительности современных компьютеров, даже на ПК можно проводить такие расчеты практически в режиме реального времени.

Во-вторых, точность получаемых результатов нивелируется значительной разницей между реальным состоянием среды распространения (ионосферы) и ее моделью, используемой при расчетах. Подробно этот вопрос рассматривается ниже. Там же предлагается метод коррекции ионосферы, использующий данные различных комплексов

радиозондирования ионосферы. Сравнение экспериментальных данных с модельными расчетами показывает, что данный метод позволяет достигать хорошего соответствия модели и реальных условий.

В-третьих, при распространении слабонаклонных траекторий в магнитоактивной среде данная система имеет особую точку для О-компоненты при $\nu=1$. Математически это выражается в возникновении неопределенности вида $\frac{0}{0}$ в формуле для показателя преломления. Стандартными численными методами обойти эту особенность не представляется возможным. Ниже приводится метод решения лучевых уравнений вблизи данной точки, разработанный для общего случая [49].

1.1.2. Особенности решения лучевых уравнений для траекторий крутопадающих на ионосферу волн

К одной из особенностей относится наличие особой точки в виде “острия” на траектории для обыкновенной волны [44,45]. Это приводит к тому, что для реальной ионосферы невозможно указать начальные условия, которые привели бы к этой особенности. В окрестности этой особенности $\nu \rightarrow 1$ и $\eta \rightarrow 0$, поэтому необходимо специальное исследование решения лучевых уравнений. В работе [46] предлагалось частичное решение проблемы, заключающееся в переброске углов в окрестности точки отражения. Описанная ниже методика впервые была предложена в [49].

Эта методика основана на построении конструкции Поверлейна для обыкновенной волны. На рисунке 1.1 показана схема этой конструкции. В левой части приведено общее схематическое изображение, в правой части – увеличенная центральная часть.

По этим соотношениям существует траектория, проходящая через центр O и для $l = 0$ получается условие ($\mathbf{k}' = -\mathbf{k}$), а оно является условием обратного распространения по той же траектории.

Для двумерных векторов систему (1.3) можно свести к системе 4-х скалярных линейных неоднородных алгебраических уравнений с 4-мя неизвестными l , m и двумя компонентами вектора $\mathbf{k}'$. Необходимо подчеркнуть, что компоненты векторов $\mathbf{k}$, $\mathbf{g}$ и $\mathbf{h}$ известны в точках A и C и решение является однозначным.

Это означает, что решение проблемы перехода от «переброски углов» к «переброске» компонент волнового вектора позволяет представить векторные соотношения (1.3) по компонентам и решать задачу в любой координатной системе. В этом заключается преимущество нового подхода, которое можно сформулировать так: не нужно следить за величинами компонент волнового вектора, достаточно включить условие переброски при $v \rightarrow 1$.

При распространении в плоскости магнитного меридиана (YOZ) компоненты волнового вектора находятся из системы

$$\begin{cases} \mathbf{k} + l \cdot \mathbf{h} = m \cdot \mathbf{g} \\ 2m \cdot \mathbf{g} + \mathbf{k}' = \mathbf{k} \end{cases},$$

где $\mathbf{k} = (k_y, k_z)$ – волновой вектор до отражения, $\mathbf{k}' = (k'_y, k'_z)$ – после отражения,

$\mathbf{h} = (\sin \alpha, \cos \alpha)$ – магнитное поле, $\mathbf{g} = (g_y, g_z) = \left(\frac{dv}{dy}, \frac{dv}{dz} \right)$ – градиент электронной

концентрации.

После преобразований получаем

$$\begin{cases} k'_y = k_y - 2m \cdot g_y \\ k'_z = k_z - 2m \cdot g_z \end{cases}, \quad (1.4)$$

где $m = \frac{k_z \sin \alpha - k_y \cos \alpha}{g_z \sin \alpha - g_y \cos \alpha}.$

Пространственные координаты $\mathbf{r} = (y, z)$ не изменяются.

Для случая трехмерно-неоднородной среды необходимо перейти к локальной магнитной системе, выполнить «переброску», затем вернуться назад к рабочей системе координат.

Для случая расширенной системы изменение волнового вектора $\mathbf{k}$ приводит к скачку производных $n^2(\mathbf{r}, \mathbf{k})$, при этом меняют свои значения все 8 величин, входящих в нее:

$\left(\frac{\partial \mathbf{r}'}{\partial \gamma}\right), \left(\frac{\partial \mathbf{k}'}{\partial \gamma}\right)$, где γ – лучевые координаты.

Значения производных от волнового вектора после отражения можно получить дифференцированием (1.3) по γ :

$$\begin{cases} \frac{\partial k'_y}{\partial \gamma} = \frac{\partial k_y}{\partial \gamma} - 2m \frac{\partial g_y}{\partial \gamma} - 2g_y \frac{\partial m}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial k'_z}{\partial \gamma} = \frac{\partial k_z}{\partial \gamma} - 2m \frac{\partial g_z}{\partial \gamma} - 2g_z \frac{\partial m}{\partial \gamma} \end{cases} \quad (1.5)$$

$$\text{Здесь } \frac{\partial g_y}{\partial \gamma} = \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\frac{dv}{dy} \right) = \frac{d^2 v}{dx dy} \frac{\partial x}{\partial \gamma} + \frac{d^2 v}{dy^2} \frac{\partial y}{\partial \gamma} + \frac{d^2 v}{dy dz} \frac{\partial z}{\partial \gamma},$$

$$\frac{\partial g_z}{\partial \gamma} = \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\frac{dv}{dz} \right) = \frac{d^2 v}{dx dz} \frac{\partial x}{\partial \gamma} + \frac{d^2 v}{dy dz} \frac{\partial y}{\partial \gamma} + \frac{d^2 v}{dz^2} \frac{\partial z}{\partial \gamma},$$

$$\frac{\partial m}{\partial \gamma} = \frac{\frac{\partial k_z}{\partial \gamma} \sin \alpha - \frac{\partial k_y}{\partial \gamma} \cos \alpha}{g_z \sin \alpha - g_y \cos \alpha} - m \cdot \frac{\frac{\partial g_z}{\partial \gamma} \sin \alpha - \frac{\partial g_y}{\partial \gamma} \cos \alpha}{g_z \sin \alpha - g_y \cos \alpha}.$$

Дифференцируя по $\gamma = (\theta, \varphi)$ дисперсионное соотношение $k^2 = n^2$, получаем после отражения

$$\begin{aligned} \mathbf{k} \frac{\partial \mathbf{k}}{\partial \gamma} &= \frac{1}{2} \frac{\partial n^2}{\partial \mathbf{r}} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \gamma} + \frac{1}{2} \frac{\partial n^2}{\partial \mathbf{k}} \frac{\partial \mathbf{k}}{\partial \gamma} \\ \left(\mathbf{k} - \frac{1}{2} \frac{\partial n^2}{\partial \mathbf{k}} \right) \frac{\partial \mathbf{k}}{\partial \gamma} &= \frac{1}{2} \frac{\partial n^2}{\partial \mathbf{r}} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \gamma} \end{aligned} \quad (1.6)$$

или

$$\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \tau} \frac{\partial \mathbf{k}}{\partial \gamma} = \frac{1}{2} \frac{\partial n^2}{\partial \mathbf{r}} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \gamma}. \quad (1.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{k}}{\partial \gamma} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \tau} &= \frac{1}{2} \frac{\partial n^2}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \gamma} + \frac{1}{2} \frac{\partial n^2}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \gamma} + \frac{1}{2} \frac{\partial n^2}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial \mathbf{k}}{\partial \gamma} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \tau} &= \frac{1}{2} \frac{\partial n^2}{\partial v} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \gamma} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \gamma} + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \gamma} \right) \end{aligned} \quad (1.8)$$

$$\text{Здесь } \frac{d\mathbf{r}}{d\tau} = \mathbf{k} - \frac{1}{2} \frac{\partial n^2}{\partial \cos \beta} \cdot \frac{\partial \cos \beta}{\partial \mathbf{k}} = \mathbf{k} - \frac{1}{2} \frac{\partial n^2}{\partial \cos \beta} \cdot \frac{1}{|\mathbf{k}|} \left(\mathbf{h} - \frac{\mathbf{k}}{|\mathbf{k}|} \cos \beta \right) = \mathbf{k} - \frac{1}{2} \frac{\partial n^2}{\partial \cos \beta} \cdot \mathbf{h}'.$$

Его можно записать в виде

$$a_1 \frac{\partial y}{\partial \gamma} + b_1 \frac{\partial z}{\partial \gamma} = c_1. \quad (1.9)$$

Это уравнение содержит две неизвестных величины $\frac{\partial y}{\partial \gamma}$ и $\frac{\partial z}{\partial \gamma}$, поэтому для полного решения необходимо еще одно уравнение с производными от пространственных координат по лучевым.

Для этого продифференцируем уравнение (1.7) по координате z (или y):

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \tau} \frac{\partial \mathbf{k}}{\partial \gamma} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{2} \frac{\partial n^2}{\partial \mathbf{r}} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \gamma} \right) - \frac{1}{2} \mathbf{h}' \frac{\partial \mathbf{k}}{\partial \gamma} \frac{\partial^2 n^2}{\partial v \partial \cos \beta} \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{1}{2} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \gamma} \left(\frac{\partial^2 n^2}{\partial v^2} \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial \mathbf{r}} + \frac{\partial n^2}{\partial v} \frac{\partial^2 v}{\partial \mathbf{r} \partial z} \right) \quad (1.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial \gamma} \left(\frac{\partial^2 n^2}{\partial v^2} \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial n^2}{\partial v} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial z} \right) + \frac{\partial y}{\partial \gamma} \left(\frac{\partial^2 n^2}{\partial v^2} \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial n^2}{\partial v} \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial z} \right) + \frac{\partial z}{\partial \gamma} \left(\frac{\partial^2 n^2}{\partial v^2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \frac{\partial n^2}{\partial v} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \\ = -h'_i \frac{\partial k_i}{\partial \gamma} \frac{\partial^2 n^2}{\partial v \partial \cos \beta} \frac{\partial v}{\partial z} \end{aligned} \quad (1.11)$$

Или

$$a_2 \frac{\partial y}{\partial \gamma} + b_2 \frac{\partial z}{\partial \gamma} = c_2 \quad (1.12)$$

Из системы двух уравнений (1.9) и (1.12) находятся величины $\frac{\partial y}{\partial \gamma}$ и $\frac{\partial z}{\partial \gamma}$.

$$\begin{cases} \frac{\partial z}{\partial \gamma} = \frac{c_1 a_2 - c_2 a_1}{b_1 a_2 - b_2 a_1} \\ \frac{\partial y}{\partial \gamma} = \frac{c_1}{a_1} - \frac{b_1}{a_1} \frac{\partial z}{\partial \gamma} \end{cases} \quad (1.13)$$

Переход к локальной магнитной системе координат

При переходе между системами координат поворот вектора $\mathbf{V}$ осуществляется с помощью соотношений:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{x'} = t_{11} V_x + t_{21} V_y + t_{31} V_z \\ V_{y'} = t_{12} V_x + t_{22} V_y + t_{32} V_z \\ V_{z'} = t_{13} V_x + t_{23} V_y + t_{33} V_z \end{array} \right\} \text{ и } \left\{ \begin{array}{l} V_x = t_{11} V_{x'} + t_{12} V_{y'} + t_{13} V_{z'} \\ V_y = t_{21} V_{x'} + t_{22} V_{y'} + t_{23} V_{z'} \\ V_z = t_{31} V_{x'} + t_{32} V_{y'} + t_{33} V_{z'} \end{array} \right\} \quad (1.14)$$

Коэффициенты перехода можно найти, подставляя в (1.28) компоненты двух известных векторов в обеих системах и пользуясь известными соотношениями

$$t_{ij} t_{kj} = t_{ji} t_{jk} = \delta_{ik}; \quad \det \| t_{ik} \| = 1, \quad (1.15)$$

где δ_{ik} – символ Кронекера.

Для нахождения коэффициентов преобразования систем координат используем

нормированные векторы $\mathbf{grad}V = \frac{dV}{dr}$ и $\mathbf{h}$.

Далее для упрощения записи заменим $\frac{dV}{dr} = V$.

В "вертикальной" системе координат, связанной с магнитным полем $x y z$, получаем:

$$\mathbf{V} = (\cos\theta \cos\varphi, \cos\theta \sin\varphi, \sin\theta),$$

$$\mathbf{h} = (0, \cos I, \sin I),$$

где I – магнитное наклонение.

В "вертикальной" рабочей системе географических координат:

$$\mathbf{V} = (\cos\theta \cos\varphi, \cos\theta \sin\varphi, \sin\theta),$$

$$\mathbf{h} = (\cos I \sin D, \cos I \cos D, \sin I),$$

где I – магнитное наклонение, отсчитываемое от Земли, D – магнитное склонение (направление на магнитный полюс, угол, заключенный между северным направлением истинного и магнитного меридианов). В северном полушарии $I < 0$ (направление вниз), в южном $I > 0$.

В локальной магнитной системе координат $x' y' z'$:

$$\mathbf{V}' = (0, 0, 1);$$

$$\mathbf{h}' = (0, \sin \alpha, \cos \alpha),$$

где α – угол между магнитным полем и вертикалью.

Здесь для удобства ось OZ выбрана вдоль направления градиента.

Угол α можно определить из взаимного расположения векторов $\mathbf{V}'$ и $\mathbf{h}'$:

$$\cos \alpha = -\frac{\mathbf{V}' \cdot \mathbf{h}'}{|\mathbf{V}'|} = -(h_x v_x + h_y v_y + h_z v_z) / |\mathbf{V}'|, \quad (1.16)$$

$$\sin \alpha = \pm \sqrt{1 - \cos^2 \alpha}.$$

Учитывая, что в северном полушарии в "вертикальной" системе координат векторы $\mathbf{V}$ и $\mathbf{h}$ направлены "вниз", угол между ними не превышает 180 град, однозначно определяем знак $\sin \alpha > 0$.

Тогда, используя соотношения (1.14), получаем 12 уравнений:

$$\begin{cases} v_x = t_{11}v'_x + t_{12}v'_y + t_{13}v'_z = t_{13}v'_z = t_{13} \\ v_y = t_{21}v'_x + t_{22}v'_y + t_{23}v'_z = t_{23}v'_z = t_{23} \\ v_z = t_{31}v'_x + t_{32}v'_y + t_{33}v'_z = t_{33}v'_z = t_{33} \end{cases} \quad (1.17)$$

$$\begin{cases} h_x = t_{11}h'_x + t_{12}h'_y + t_{13}h'_z = t_{12}h'_y + t_{13}h'_z = t_{12}\sin\alpha + t_{13}\cos\alpha \\ h_y = t_{21}h'_x + t_{22}h'_y + t_{23}h'_z = t_{22}h'_y + t_{23}h'_z = t_{22}\sin\alpha + t_{23}\cos\alpha \\ h_z = t_{31}h'_x + t_{32}h'_y + t_{33}h'_z = t_{32}h'_y + t_{33}h'_z = t_{32}\sin\alpha + t_{33}\cos\alpha \end{cases} \quad (1.18)$$

$$\begin{cases} v'_x = t_{11}v_x + t_{21}v_y + t_{31}v_z = \cos\theta\cos\varphi \cdot t_{11} + \cos\theta\sin\varphi \cdot t_{21} + \sin\theta \cdot t_{31} = 0 \\ v'_y = t_{12}v_x + t_{22}v_y + t_{32}v_z = \cos\theta\cos\varphi \cdot t_{12} + \cos\theta\sin\varphi \cdot t_{22} + \sin\theta \cdot t_{32} = 0 \\ v'_z = t_{13}v_x + t_{23}v_y + t_{33}v_z = \cos\theta\cos\varphi \cdot t_{13} + \cos\theta\sin\varphi \cdot t_{23} + \sin\theta \cdot t_{33} = 1 \end{cases} \quad (1.19)$$

$$\begin{cases} h'_x = t_{11}h_x + t_{21}h_y + t_{31}h_z = \cos I \cdot t_{21} + \sin I \cdot t_{31} = 0 \\ h'_y = t_{12}h_x + t_{22}h_y + t_{32}h_z = \cos I \cdot t_{22} + \sin I \cdot t_{32} = \sin\alpha \\ h'_z = t_{13}h_x + t_{23}h_y + t_{33}h_z = \cos I \cdot t_{23} + \sin I \cdot t_{33} = \cos\alpha \end{cases} \quad (1.20)$$

Из (1.17) и (1.18) получаем следующие коэффициенты:

$$\begin{aligned} t_{13} &= \cos\theta\cos\varphi; \\ t_{23} &= \cos\theta\sin\varphi; \\ t_{33} &= \sin\theta; \\ t_{12} &= (h_x - t_{13}\cos\alpha)/\sin\alpha; \\ t_{22} &= (h_y - t_{23}\cos\alpha)/\sin\alpha; \\ t_{32} &= (h_z - t_{33}\cos\alpha)/\sin\alpha; \end{aligned}$$

Для нахождения оставшихся неизвестных коэффициентов t_{11}, t_{21}, t_{31} используем уравнения (1.19) и (1.20), а также соотношение (1.15). Получается система уравнений

$$\begin{cases} v'_x = t_{11}v_x + t_{21}v_y + t_{31}v_z = 0 \\ h'_x = t_{11}h_x + t_{21}h_y + t_{31}h_z = 0 \\ t_{11}(t_{22}t_{33} - t_{23}t_{32}) + t_{21}(t_{13}t_{32} - t_{12}t_{33}) + t_{31}(t_{12}t_{23} - t_{22}t_{13}) = 1 \end{cases} \quad (1.21)$$

$$\text{Отсюда } t_{11} = \frac{v_y h_z - v_z h_y}{DD};$$

$$t_{21} = -\frac{v_x h_z - v_z h_x}{DD};$$

$$t_{31} = \frac{v_x h_y - v_y h_x}{DD},$$

где DD – определитель системы.

Таким образом, известны все коэффициенты перехода. Теперь можно по формулам (1.14) получить координаты векторов $\mathbf{k}$ и $\mathbf{g}$ в локальной системе координат, а далее, с помощью (1.4), вернуться в «рабочую» систему координат. Необходимость решения данной задачи подтверждается результатами экспериментов при использовании крутопадающих волн для исследования распространения ПИВ [50].

1.1.4 Решение граничной задачи

Далее используем эту методику.

В связи с многолучевостью принимаемого сигнала интерес представляет нахождение всех возможных траекторий, вышедших из одной точки (передатчик) и пришедших в другую (приемник). Такая задача относится к классу граничных.

При решении этой задачи для заданной трассы в общем случае трехмерно-неоднородной среды распространения (3D-модель ионосферы) необходимо найти такие начальные азимутальный угол α_0 и угол места Δ_0 , которые обеспечат приход волны на поверхность Земли в точку с координатами (θ_k, φ_k) .

Следовательно, получаем систему двух нелинейных уравнений с двумя независимыми переменными α и Δ :

$$\begin{cases} \theta(\Delta, \alpha) - \theta_k = 0, \\ \varphi(\Delta, \alpha) - \varphi_k = 0. \end{cases} \quad (1.22)$$

Здесь $\theta(\Delta, \alpha)$, $\varphi(\Delta, \alpha)$ – текущие координаты точки прихода волны на поверхность Земли. Начальные значения азимута α и угла места Δ задаются произвольно.

Решение такой задачи в возмущенных условиях наталкиваются на трудности, связанные с невозможностью нахождения абсолютно всех решений системы (1.22) за разумное время расчетов. В случае, когда точки совпадают или находятся достаточно близко, необходимо использовать некоторые упрощения общей системы. В случае достаточно протяженной трассы распространения радиоволн предлагается следующий алгоритм, позволяющий определить практически все решения граничной задачи (1.22).

Последовательность нахождения корней системы (1.22) состоит в следующем:

1. Географический азимут трассы α_0 и ее протяженность D_0 находятся по известным координатам пунктов передачи и приема.
2. Угол места Δ_0 находится методом дихотомии и секущих для найденного азимута α_0 . Для него решение системы (1.22) приводит к соотношению $D(\Delta_0, \alpha_0) - D_0 \leq \lambda_p$. Здесь $D(\Delta, \alpha)$ – расстояние между точкой передачи и точкой прихода радиоволн с текущими начальными значениями (Δ, α) , λ_p – длина зондирующей волны.
3. Затем методом координатного спуска выполняется один шаг для системы:

$$\begin{cases} D(\Delta, \alpha) - D_0 = 0 \\ \psi(\Delta, \alpha) - \psi_0 = 0 \end{cases} \quad (1.23)$$

с начальными условиями $(\Delta_0, \alpha_0 + \delta\alpha)$, где $\psi(\Delta, \alpha)$ – азимут точки прихода.

4. Найденные значения (Δ_1, α_1) подставляются в качестве начального условия модифицированного метода Ньютона и находится корень системы (1.22) с заданной погрешностью. Точность решения выбирается из условия, что расстояние между искомой точкой прихода и положением приемной антенны не превышает $\lambda_p/30$.
5. Ищутся остальные возможные лучи. Для этого задается следующее значение $\alpha = \alpha_1 + 1^\circ$.
6. Повторяются операции по п.п. 3-5 до тех пор, пока $\delta\alpha < 15^\circ$.
7. Далее повторяется процедура п.п. 2-6 с углами $\Delta = \Delta_0$, пока не выполнится условие $\Delta_0 \geq 85^\circ$ или не наступит эффект прохождения сигнала сквозь ионосферу.

Такая методика позволяет найти практически все корни системы (1.22), т.е. все лучи, с минимальными затратами времени.

Двумерный случай

Предложенный алгоритм хорошо работает для достаточно протяженных трасс, где можно выделить «базовую плоскость», проходящую через передатчик, приемник и центр Земли, и искомые решения заметно разнесены в пространстве возможных решений. В других случаях (вертикальное и внешнее зондирование, а также транзондирование с высокоэллиптических орбит) качество его работы снижается. В этих случаях, если необходимо найти максимальное число решений (в том числе и близкорасположенных друг от друга), необходимо использовать различные упрощения. С этой целью по косвенным признакам выбирается некоторая «плоскость распространения лучей» и рассматривается двумерный вариант. В этом случае для вертикального зондирования естественно выбрать плоскость магнитного меридиана (тогда в магнитоактивной среде лучи не выходят за ее границы). Для транзондирования это может быть плоскость, проходящая через спутник и наземный приемник.

Использование двумерного приближения (2D-модель ионосферы) позволяет найти все существующие решения. К тому же система (1.23) принимает вид одиночного уравнения:

$$D(f, \Delta_0) = R, \quad (1.24)$$

где D, f, Δ_0, R – те же параметры, что и в предыдущем случае, но в проекции на указанную поверхность: D – длина дуги, Δ_0 – угол места, f – рабочая частота, R – расстояние.

Поскольку в общем случае априорной информации о локализации корней граничной задачи (1.24) нет, алгоритм решения должен включать возможность поиска нескольких корней.

Это приводит к трудностям:

- поиска всех существующих корней, необходимых для получения полной лучевой структуры сигнала в пункте приема;
- нахождения решения с достаточной точностью (не менее 10 м);
- быстрой сходимости решения.

Для локализации корней уравнения (1.24), если они имеются, подходит метод пристрелки, а для поиска корня – совокупность методов бисекции и секущих с быстрой сходимостью итерационного процесса при минимальном количестве вычислений. Условие, при котором отклонение $F(\Delta) = D(f, \Delta) - R$ становится меньше критерия точности, служит критерием существования корня. Это означает, что найдено одно из решений граничной задачи.

1.1.5 Сравнение численных методов, используемых для решения задач распространения радиоволн

1.1.5.1. Распространение на наклонных радиотрассах

Как отмечалось в начале раздела 1.1.1, функционирование современных технологических систем требует максимального соответствия используемой модели реальным условиям, однако в этом случае для расчета траекторий необходимо использовать только численные методы. И в неоднородной ионосфере это приводит к неинтегрируемой гамильтоновой системе, для численного решения которой в литературе имеется много примеров [51-53]. Одна из проблем связана с тем, что определение траекторных характеристик требует огромного количества времени расчета, приводя к неэффективности процесса.

Проблема выбора эффективного численного метода интегрирования подробно описана в работе автора [54]. Ниже даются основные результаты.

Определяются две основные составляющие: быстродействие, как количество перевычислений функций правых частей уравнений на интервале интегрирования, и точность численного интегрирования, зависящую от порядка аппроксимирующей формулы. В работе [55] показано, что повышение порядка обычно приводит к улучшению устойчивости метода и может уменьшить глобальную ошибку интегрирования. При оценке точности нужно учитывать зависимость функций правых частей уравнений от профиля электронной концентрации ионосферы, которая приводит к их сильно неравномерному изменению вдоль траектории, особенно в условиях возмущенного состояния, нерациональному дроблению шага интегрирования, увеличению затрат машинного времени.

Для выбора метода необходим сравнительный анализ существующих методов.

Все обсуждаемые ниже численные методы интегрирования дифференциальных уравнений являются дискретными методами, позволяющими определить значения искомых функций на множестве точек $\{t_n, n \in N\}$. Переход к новым значениям функций реализуется на основании функциональной зависимости, определяемой правыми частями дифференциальных уравнений и ранее определёнными значениями функций x_k , а также независимой переменной t_k . Необходимо привести некоторые определения. В частности, метод считается *явным* или *неявным* в зависимости от того, явно или неявно входят искомые значения функций в упомянутые выше зависимости. Метод является *одношаговым*, если используются лишь значения функций на предыдущем шаге, и *многошаговым*, если используются значения функций, рассчитанные на нескольких предыдущих шагах.

Из большого числа методов можно выделить такие, как методы Рунге-Кутты-Фельберга [56,57], Дормана-Принса [58], Грегга-Булирша-Штера [59], прогноза и коррекции Адамса-Башфорта-Мултона [60], подходящие для численного моделирования траекторных расчетов.

Разнообразие методов связано с необходимостью удовлетворить противоречивым требованиям. В работе [54] найден определенный компромисс по отношению к параметрам: 1) зависимости эффективности счёта от временных затрат, 2) качества результатов по сходимости решений к общему значению при ужесточении условий.

Методы Рунге-Кутты

Одношаговые методы Рунге-Кутты взяли от метода Эйлера большую скорость расчета и большую точность.

Обозначим s – целое число (число стадий) и a_{ij}, b_i, c_j – вещественные коэффициенты.

Тогда численный метод

$$\begin{aligned} k_1 &= f(t_0, y_0), \\ k_2 &= f(t_0 + c_2 h, y_0 + h a_{21} k_1), \\ &\dots \\ y_1 &= y_0 + h(b_1 k_1 + \dots + b_s k_s) \end{aligned} \tag{1.25}$$

называется *s-стадийным явным методом Рунге-Кутты*.

Обычно коэффициенты c_j удовлетворяют условиям

$$c_2 = a_{21}, \quad c_3 = a_{31} + a_{32}, \quad \dots, \quad c_s = a_{s1} + a_{s2} + \dots + a_{s,s-1}, \tag{1.26}$$

или, короче,

$$c_i = \sum_j a_{ij}. \quad (1.27)$$

Поскольку правые части дифференциальных уравнений изменяются с различной скоростью, нужно уделять большое внимание выбору шага интегрирования и порядка, контролируемых мониторингом погрешности интегрирования, управляя длиной шага. Это приводит к методу Рунге-Кутты с переменным шагом (так называемому вложенному методу) и увеличению скорости расчетов без потери точности.

Суть вложенного метода заключается в использовании для контроля $s+1$ стадийного метода порядка $p+1$, в который уже встроен s -стадийный метод порядка p (Фельберг [56, 57]). В настоящее время наиболее часто используется метод с $s=6$ и $p=4$.

Методы Дормана-Принса

Эти методы также относятся к явным одношаговым многостадийным методам типа Рунге-Кутты [58], отличающимся от методов Фельберга формулами, минимизирующими члены погрешности старшего порядка и управляющими длиной шага для членов погрешности младшего порядка, увеличивая точность.

За последнее время разработаны методы высоких порядков, а также схемы расчёта коэффициентов метода [58]. В качестве примера можно упомянуть формулу порядка 8(7).

Выбор алгоритмов более высокого порядка связан с увеличением порядка метода и значительным ростом числа вычислений правых частей. Однако в алгоритме Дормана-Принса это увеличение компенсируется увеличением шага интегрирования, в том числе за счет удачной реализации мониторинга погрешности.

Метод Грегга-Булирша-Штера

Отличием экстраполяционных методов Булирша и Штера является отсутствие необходимости многократных перевычислений правых частей. Поскольку с увеличением порядка экстраполяции возрастает влияние погрешностей округления, порядок метода, как правило, не превышает 6.

Достоинством метода является полная таблица результатов вычислений

$$\begin{array}{l} T_{11} \\ T_{21} \ T_{22} \\ T_{31} \ T_{32} \ T_{33} \dots \dots\dots, \end{array} \quad (1.28)$$

которые представляют последовательность вложенных методов и позволяют оценить локальную погрешность и выбрать стратегию методов переменного порядка.

Базовая последовательность также обладает разнообразием. Это могут быть последовательность Ромберга [61] 1, 2, 4, 8, 16, 32,...; последовательность Булирша 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 24, 32,...; гармоническая последовательность 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7. Однако сами авторы [59] считали, что лучше использовать рациональные функции вместо полиномиальной интерполяции (1.28). Позже автор [62] показал, что рациональная экстраполяция почти никогда не является более выигрышной, чем полиномиальная.

Метод Адамса-Башфорта-Мултона

Метод прогноза и коррекции Адамса-Башфорта-Мултона является комбинацией явного и неявного многошаговых методов.

Рассмотрим задачу Коши в виде:

$$y' = f(x, y), \quad a \leq x \leq b \quad (1.29)$$

Метод основан на аппроксимации $f(x, y(x))$ полиномом $p(x)$. Рассуждая так же, как для метода Адамса-Башфорта, который излагается в работах [60, 63], можно прийти к следующему.

Метод Адамса-Башфорта использует уже посчитанные значения в точке x_k и в предыдущих точках. В принципе, при построении интерполяционного полинома, мы можем использовать и точки $x_{k+1}, x_{k+2}, \dots$. Простейший случай при этом состоит в использовании точек $x_{k+1}, x_k, \dots, x_{k-N}$ и построении интерполяционного полинома степени $N+1$, удовлетворяющего условиям $P(x_i) = f_i$, ($i=k+1, k, \dots, k-N$). При этом возникает класс методов, известных как методы Адамса-Мултона. Если $N=0$, то p – линейная функция, проходящая через точки (x_k, f_k) и (x_{k+1}, f_{k+1}) , и соответствующий метод

$$y_{k+1} = y_k + \frac{h}{2}(f_{k+1} + f_k) \quad (1.30)$$

является методом Адамса-Мултона [60]. Если $N=2$, то p – кубический полином, построенный по точкам (x_{k+1}, f_{k+1}) , (x_k, f_k) , (x_{k-1}, f_{k-1}) , (x_{k-2}, f_{k-2}) и соответствующий метод

$$y_{k+1} = y_k + \frac{h}{24}(9f_{k+1} + 19f_k - 5f_{k-1} + f_{k-2}) \quad (1.31)$$

является методом Адамса-Мултона четвертого порядка. В силу того, что, по сути, f_{k+1} – неизвестная, методы Адамса-Мултона (1.30), (1.31) называют неявными. В тоже время методы Адамса-Башфорта – называют явными.

Теперь, воспользовавшись явной и неявной формулами, используя их совместно, мы приходим к методу Адамса-Башфорта четвертого порядка.

Стоит обратить внимание, что в целом этот метод является явным. Сначала по

формуле Адамса-Башфорта вычисляется значение $y_{k+1}^{(p)}$, являющееся “прогнозом”. Затем $y_{k+1}^{(p)}$ используется для вычисления приближенного значения f_{k+1} , которое в свою очередь используется в формуле Адамса-Мултона. Таким образом, формула Адамса-Мултона “корректирует” приближение, называемое формулой Адамса-Башфорта. Объединяя, получаем следующий метод интегрирования: сначала используем метод Эйлера на первом шаге, трех точечный метод прогноза и коррекции с автоподбором шага на малом промежутке времени и с малым начальным шагом, для повышения точности стартующих методов, затем на оставшемся промежутке времени производим интегрирование с постоянным шагом – пятиточечный метод прогноза и коррекции Адамса-Башфорта-Мултона (1.31) [60].

Для k -шагового метода предсказывающий и исправляющий алгоритмы приведены в [64].

Описанный метод имеет некоторые отличительные особенности: 1) содержит фазу разгона, реализуемую с помощью различных процедур (отличие многошагового метода от одношагового), 2) вычисление правых частей производится на каждом шаге только несколько раз (и хотя это может повысить эффективность счёта, но также и понизить устойчивость метода), 3) легкость изменения порядка метода, 4) сохранение шага интегрирования, приводящее к значительной экономии машинного времени.

Представленный в работе [65] метод Гира является другой реализацией предикторно-корректорной схемы.

Сравнение предлагаемых численных методов

Выше описаны существующие численные методы. В этом разделе приведены результаты сравнения численных методов применительно к построению лучевых траекторий в неоднородной ионосфере. Сравнение проводилось по двум параметрам – быстродействие и точность интегрирования для выбора наилучшего метода.

В разделе 1.5.1.1 уже указывалось на зависимость эффективности численного алгоритма от его точности и быстродействия. Предложено считать алгоритм эффективным, если он обеспечивает наибольшее быстродействие при фиксированной точности. Эти характеристики важны при решении таких задач, как нахождение, изучение влияния многолучевости и неоднородной структуры на свойства канала связи и другие.

При этом требования, налагаемые на результаты решения, также достаточно сильно различаются. Например, при расчете ДЧХ необходима максимальная скорость, а погрешность может достигать километров. Модель также может быть упрощена для ускорения расчетов. В случае исследования многолучевого сигнала, наоборот, для точного

учета фазы погрешность расчета каждого луча не должна превышать нескольких десятков сантиметров.

Тестирование проведено для условий, требующих решения граничной задачи в общем виде (3D модель ионосферы), и двумерного приближения (2D). Способы решения для них описаны выше. В первой модели вертикальный профиль задается суммой нескольких связанных квазипарабол и двух неоднородностей в виде двух волн плотности в плоскости распространения луча. Для тестирования второй (более общей) модели выбрали: аппроксимацию модели IRI [66] трехмерным кубическим сплайном с наложенными двумя монохроматическими волнами, имеющими произвольные пространственные параметры, и двухскачковую трассу с изотропной ионосферой для всех типов методов:

- RKF2(3) – метод Рунге-Кутты-Фельберга порядка 2(3);
- RKF4(5) – метод Рунге-Кутты-Фельберга порядка 4(5);
- DOPR5(4) – метод Дормана-Принса порядка 5(4);
- DOPR8(7) – метод Дормана-Принса порядка 8(7);
- GBS2 – метод Грегга-Булирша-Штера 2-го порядка;
- GBS3 – метод Грегга-Булирша-Штера 3-го порядка;
- GBS4 – метод Грегга-Булирша-Штера 4-го порядка;
- GBS5 – метод Грегга-Булирша-Штера 5-го порядка;
- GBS6 – метод Грегга-Булирша-Штера 6-го порядка;
- ADAMS3 – метод Адамса-Башфорта-Мултона 3-го порядка;
- ADAMS4 – метод Адамса-Башфорта-Мултона 4-го порядка;
- ADAMS5 – метод Адамса-Башфорта-Мултона 5-го порядка;
- GIR2 – метод Гира 2-го порядка;
- GIR3 – метод Гира 3-го порядка;
- GIR4 – метод Гира 4-го порядка;
- GIR5 – метод Гира 5-го порядка;
- GIR6 – метод Гира 6-го порядка.

Если в списке присутствует один метод с различными порядками, значит, они дают различные результаты.

Для каждого метода значения допустимой погрешности (D) перебирались на одном шаге от 10^{-6} до 10^{-13} с шагом в 0,1.

Сравнивались значения двух основных параметров:

- быстродействия, определяемого как суммарное время расчета большого набора траекторий с различным углом вылета от 1 до 70 градусов. Конкретные

значения числа итераций ($N_{ит}$) и числа обращений к правой части системы ($N_{выз}$) для одной и той же траектории использовались в качестве дополнительного критерия;

- точности интегрирования. Из-за отсутствия априорного значения в качестве точного выбрано значение, к которому в большинстве случаев должен сходиться результат всех методов. Тогда разность между полученной величиной и «точным» значением можно считать точностью решения.

Тестирование показало, что лучшими оказались методы:

- RKF4(5) – метод Рунге-Кутты-Фельберга порядка 4(5);
- DOPR5(4) – метод Дормана-Принса порядка 5(4);
- ADAMS5 – метод Адамса-Башфорта-Мултона 5-го порядка;
- GIR6 – метод Гира 6-го порядка.

Рисунки 1.2-1.5 показывают зависимости координат точки прихода и времени расчетов от заданной точности. Цифрами отмечены методы: 1 – RKF4(5); 2 – DOPR5(4); 3 – ADAMS5; 4 – GIR6.

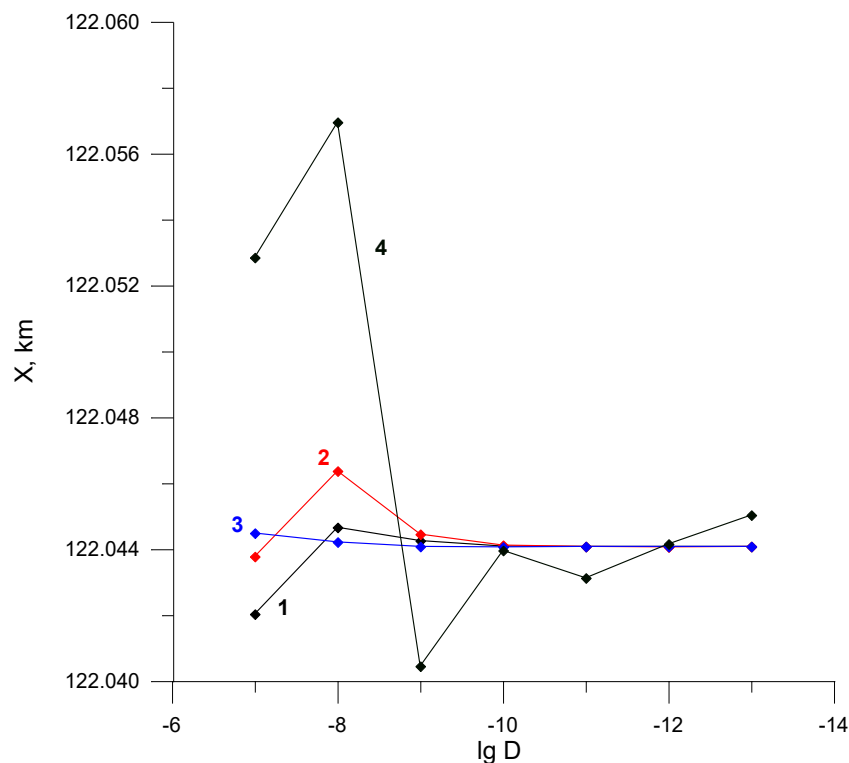


Рисунок 1.2 - Зависимость координаты точки прихода от заданной точности для 2D-задачи. Полярный угол траектории 70 град. Цифры обозначают следующие методы: 1 – RKF4(5); 2 – DOPR5(4); 3 – ADAMS5; 4 – GIR6

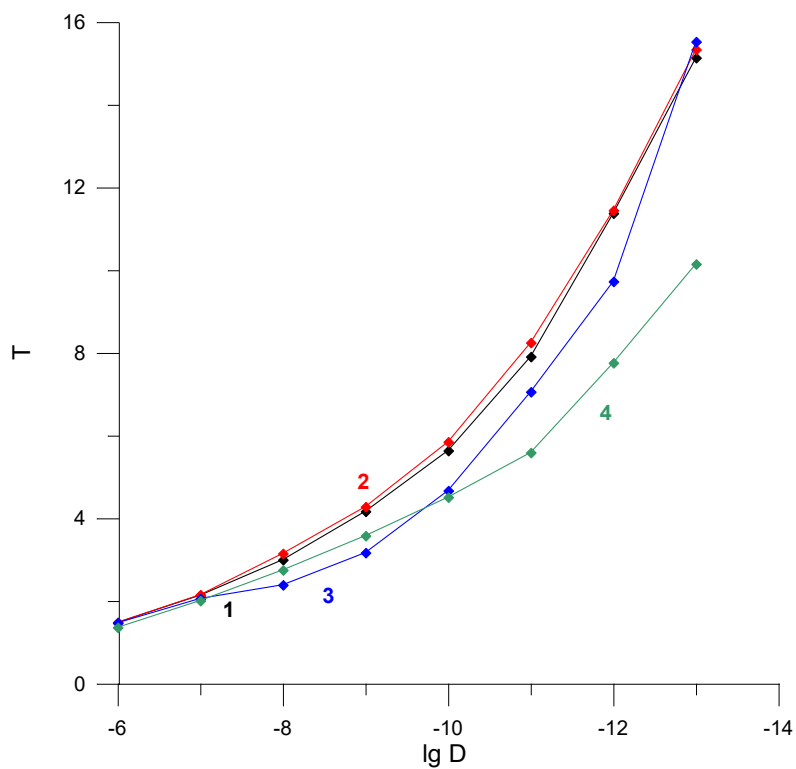


Рисунок 1.3 - Влияние точности на время расчетов для 2D-задачи. Обозначения соответствуют рисунку 1.2

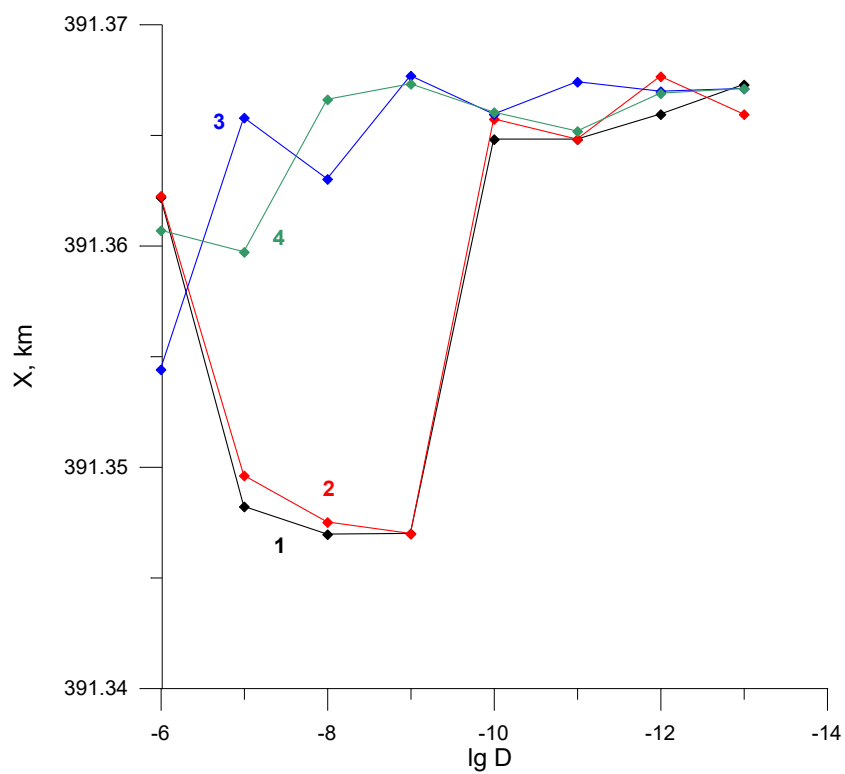


Рисунок 1.4 - Зависимость координаты точки прихода от заданной точности для 3D-задачи. Полярный угол траектории 70 град. (Цифры как на рисунке 1.2)

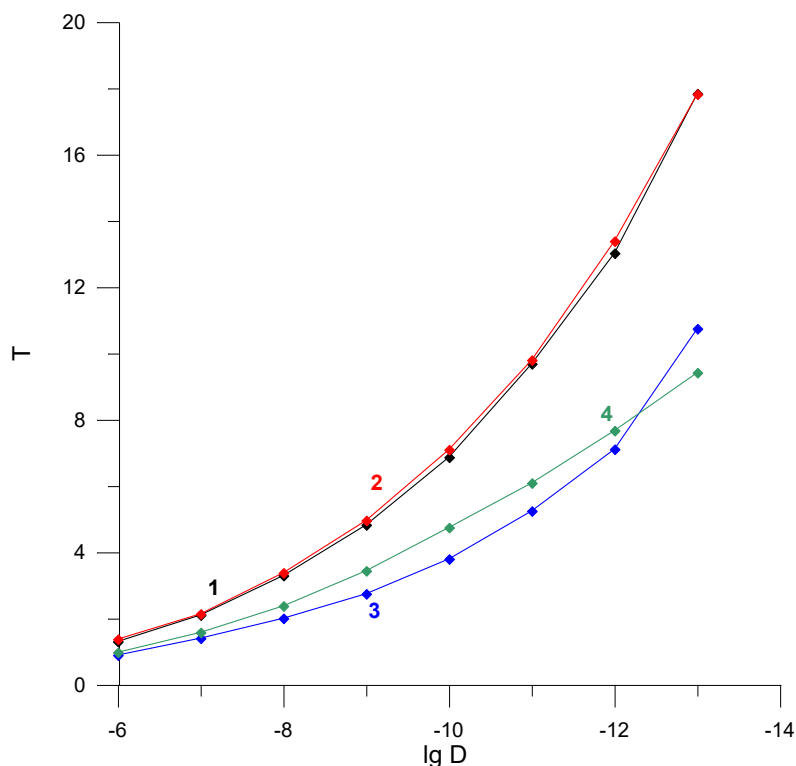


Рисунок 1.5 - Влияние точности на время расчетов для 3D-задачи. Обозначения соответствуют рисунку 1.2

Результаты показывают, что по времени счета лучшими являются ADAMS5 и GIR6, но для GIR6 не всегда имеется достаточная точность.

Приведенные результаты были получены для случая изотропной ионосферы. Дополнительные тесты в магнитоактивной ионосфере показали непротиворечивые результаты по сравнению с изотропным случаем. Однако при расчетах вблизи точки отражения луча для углов отражения, близких в 90 град, у большинства методов возникли затруднения. В этом случае наиболее эффективными оказались методы RKF и DOPR.

Таким образом, для изотропной среды с учетом соотношения быстродействие-точность расчета лучшим методом расчета следует признать предикторно-корректорную схему Адамса пятого порядка. В случае учета магнитоактивности среды распространения эффективными являются методы RKF и DOPR.

1.1.5.2. Трансионосферное распространение на трассах «спутник-земля»

Другим примером расчета траекторий может служить распространение радиоволн на трассе «GPS-спутник – наземный приемник». В данном случае точность расчетов играет особую роль, т.к. одночастотный GPS-приемник определяет местоположение оператора по времени распространения сигналов (групповому пути) от разных спутников сети.

Условия распространения сигнала здесь заметно отличаются от использованных в предыдущем разделе:

- дальность распространения луча на такой трассе достигает 20000 км и более;
- рабочая частота выходит далеко за стандартные границы ВЧ-диапазона и составляет 1542,75 МГц;
- на большей части траектории изменения среды распространения очень малы.

Т.о., вызывает большой интерес определение оптимальных численных методов для расчета траекторий в таких условиях.

Были проведены сравнительные расчеты, аналогичные описанным выше. Для общности использовались те же самые расчетные схемы, что и ранее. Более подробно методика и результаты моделирования описаны в [67].

Тестирование и сравнение методов проводились аналогично случаю наклонной трассы. Для описания ионосферы использовалась модель NeQuick.

Оказалось, что лучшими также являются методы RKF4(5), DOPR5(4), ADAMS5 и GIR6.

Для этого типа распространения траектории рассчитывались для каждого метода на трассе «навигационный спутник – наземный приемник» с допустимой погрешностью на одном шаге – от 10^{-6} до 10^{-14} с шагом в 0,1.

Расчеты таких траекторий выявили особенность, связанную с распространением на больших высотах: из-за малого изменения электронной концентрации шаг метода сильно увеличивается, приводя к увеличению ошибки. Следовательно, это заставило ввести контроль шага интегрирования.

Для трассы «GPS-спутник – наземный приемник» расчеты показали преимущество явного одношагового метода Рунге-Кутты - Фельберга порядка 4(5) или предикторно-корректорной схемы Адамса пятого порядка. В зависимости от максимального шага точность метода может составлять 10^{-6} - 10^{-7} для шага 2 км и 10^{-12} - 10^{-13} для шага 20 км. При этом точность меньше 0.5 м. На ПК с процессором со средним быстродействием время расчета одной траектории составляет не более 0.1 сек.

Дополнительно получен интересный и важный результат малости смещения траекторий от дуги большого круга, что важно для систем позиционирования. Полученные результаты показывают возможность использования двумерного приближения для расчета траекторий на трассе «навигационный спутник – наземный приемник».

С точки зрения выбора наилучшего метода были проведены расчеты для достаточно большого числа методов при решении двух задач с сильно отличающимися условиями, результаты которых позволяют утверждать, что явный одношаговый метод Рунге-Кутты-Фельберга порядка 4(5) или предикторно-корректорная схема Адамса пятого порядка являются наиболее эффективными алгоритмами для расчета траекторий в методе

характеристик.

1.1.6. Сравнение метода характеристик с методом подталкивания упругой нити

Несмотря на многолетнее успешное применение метода характеристик в разных задачах [65], это не отменяет поиск альтернативных подходов, в частности, из других областей науки. Одним из вариантов может быть использование вариационного принципа, хорошо показавшего себя в задачах сейсмологии [69-73]. В работах [74,75] предпринята попытка применить этот метод к задаче распространения КВ и сравнить его с методом характеристик.

Рассмотрим данный метод более подробно.

Согласно принципу Ферма о минимуме фазового расстояния [76], траектория радиолуча обеспечивает экстремум (минимум) функционала оптической длины пути

$$S[\gamma] = \int_A^B n(\mathbf{r}) dl. \quad (1.32)$$

Здесь интегрирование производится вдоль кривой, задающей траекторию луча, которая соединяет точки A и B , $n(\mathbf{r})$ – показатель преломления в точке $\mathbf{r}$, лежащей на кривой, и dl – элемент длины вдоль γ .

При этом кривая γ является начальным приближением для решения задачи нахождения радиотрассы. Форма кривой может задаваться произвольным образом. Задача расчета радиотрассы сводится к поиску минимума функции оптической длины пути.

Многие численные методы поиска минимума многомерной функции основаны на вычислении антиградиента целевой функции

$$\mathbf{F} = -\nabla S \quad (1.33)$$

В данном случае $\mathbf{F}$ имеет смысл силы, действующей в каждой точке кривой γ . Эта сила стремится выстроить точки вдоль искомой траектории радиотрассы.

Результаты расчетов

В качестве среды для численных расчетов радиотрасс коротковолнового диапазона была выбрана двумерная изотропная модель ионосферы, где электронная концентрация задавалась по международной справочной модели IRI-2007. В качестве граничных условий были выбраны гипотетическая передающая станция, которая располагалась в г. Калининграде, Россия (54,57° с.ш.; 20° в.д.), и приемная станция в г. Тромсё, Норвегия (65,65° с.ш.; 18,57° в.д.). Проводилось сравнение результатов, полученных двумя методами – методом характеристик и методом подталкивания упругой нити.

На рисунке 1.6 представлены результаты расчетов радиотрасс Калининград – Тромсё, полученных с использованием метода подталкивания упругой нити для частоты 9 МГц. Поиск верхних решений осуществлялся перебором начальных приближений на различных высотах. Результаты расчетов методом подталкивания упругой нити дают такие же результаты, что и метод характеристик. При этом оба метода находят все возможные верхние лучи. Однако поиск нижних лучей методом подталкивания упругой нити без дополнительной информации не приводит к успешному результату. Поэтому нижние лучи на рисунке 1.6 получены с использованием заранее известной информации о точке отражения, полученной в решении методом пристрелки.

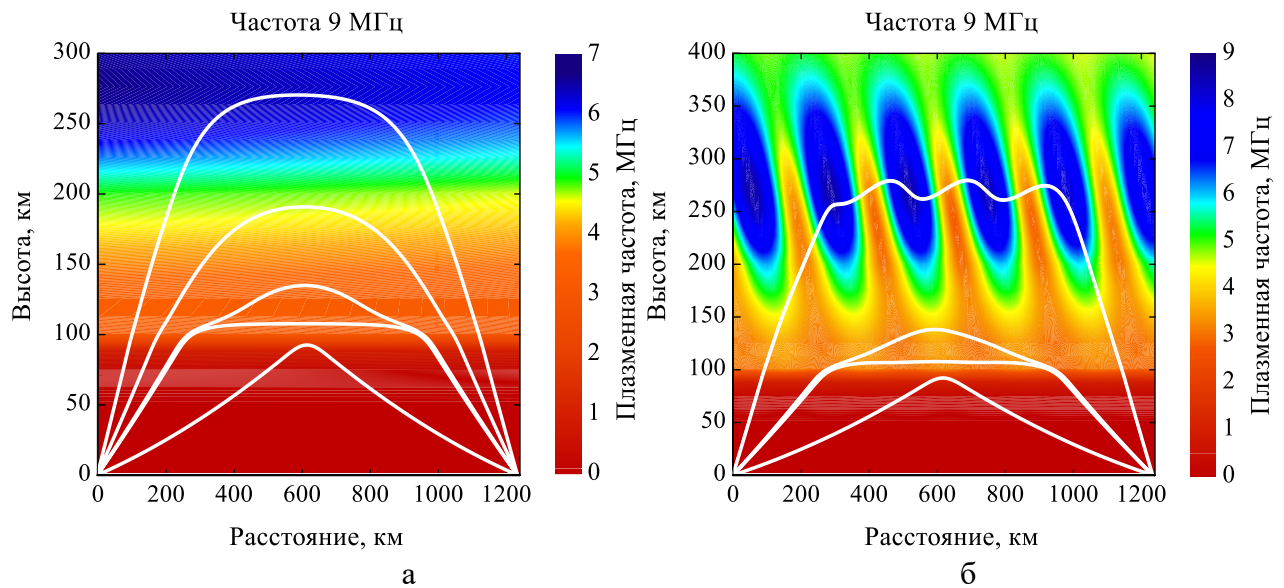


Рисунок 1.6 - Результаты расчетов радиотрасс с частотой 9 МГц методом подталкивания упругой нити в изотропной среде, где электронная концентрация задавалась по модели IRI (а), и с наличием перемещающихся ионосферных возмущений (б)

На рисунке 1.6(б) показаны результаты расчетов радиотрасс Калининград – Тромсё для модельной ионосферы с ионосферными неоднородностями, полученные с использованием метода характеристик. Они сопоставлялись с численным моделированием на основе метода подталкивания упругой нити. Результаты расчетов, полученные различными методами, хорошо согласуются.

Это сравнение результатов, полученных разными подходами, является дополнительным подтверждением того, что метод характеристик в приближении геометрической оптики правильно работает в ионосфере, т.е. дает корректные результаты.

Кроме того, метод характеристик более предпочтителен и позволяет, в отличие от метода подталкивания упругой нити:

- находить все лучи, приходящие в точку наблюдения;

- использоваться не только при решении граничной задачи, но и для расчета произвольной траектории;
- рассчитывать многоскачковые трассы.

1.2. Модели ионосферы

Другим важным фактором, влияющим на качество решения задачи моделирования распространения радиоволн в ионосфере, является среда распространения (например, [77]). От того, насколько задаваемое моделью распределение электронной концентрации в ионосфере соответствует ее реальному состоянию, зависит точность результатов теоретических расчетов. Нужно отметить, что существует много моделей для расчета характеристик распространения радиоволн (IRI, NeQuick, SIMP, IRI-Plas и др.). Ниже дается краткое описание их достоинств и недостатков, а также проведено их сравнение на основе экспериментальных данных.

Эти модели соответствуют состоянию спокойной невозмущенной ионосферы. Эксперименты же показывают, что в ионосфере практически постоянно присутствуют различные неоднородные структуры, диапазон высот которых составляет от 50 до 1000 км [2], а характерные масштабы от нескольких метров до сотен километров [6,38]. Их влияние на распространение радиоволн, в зависимости от размеров, может быть различным – рассеяние, возникновение многолучевости, искривление отдельных лучей и т.д. Исходя из этого, необходимо иметь возможность дополнить глобальное распределение электронной концентрации, задаваемое моделью, теоретическим описанием неоднородных структур, что также будет сделано ниже.

1.2.1. Современные глобальные модели ионосферы

Целью первого этапа являлся выбор наилучшей модели для моделирования распространения и корректировки модели. Основное требование сводится к тому, чтобы модель обеспечивала значение электронной концентрации в любой точке траектории, вплоть до высот спутников GPS, ГЛОНАСС.

Поскольку все вышеперечисленные модели являются моделями медианного типа, необходимо их корректировать в режиме, близком к реальному времени, для учета реальных условий. К корректируемым параметрам относятся:

- критическая частота и высота максимума слоя E;
- критическая частота и высота максимума слоя F1 (если он есть);
- критическая частота и высота максимума слоя F2;

- дополнительные параметры (например, параметры V_0 , V_1 , уровень F-рассеяния и др.);
- полное электронное содержание (TEC).

Сравнение выбранных моделей проведено по двум критериям:

- качество представления верхней части ионосферы (выше высоты максимума слоя F2);
- наличие параметров, доступных для коррекции.

Тестировались следующие модели:

- IRI-2016;
- IRI-Plas;
- SIMP;
- NeQuick;
- комбинированная модель.

Ниже кратко дается описание каждой модели.

1. Модель IRI-2016

Эмпирическая модель IRI (International Reference Ionosphere – Международная Справочная Модель Ионосферы) является наиболее разработанной и постоянно модифицированной. Об этом свидетельствует наличие нескольких версий, из которых последними являются IRI-2016 [66,78] и IRI-2020. Модель IRI позволяет определять основные параметры ионосферы f_oF_2 , $M(3000)F_2$, f_oF_1 , f_oE , h_mF_2 , а также $N(h)$ -профиль. Основными источниками данных, которые используются в данной модели, являются: всемирная сеть ионозондов, спутниковые и ракетные измерения, а также данные радаров некогерентного рассеяния. Начиная с версии IRI-2001, введен коэффициент коррекции (STORM-factor) для критических частот f_oF_2 , зависящий от индекса геомагнитной активности. Существует сайт, на котором имеется полная информация о модели и ее реализации в виде соответствующих программ.

К достоинствам также относится возможность коррекции модели с использованием мгновенных значений параметров, чтобы приблизить модельный профиль к реальному. Для задания профиля верхней ионосферы предусмотрено несколько вариантов.

Недостатками являются недостаточное количество станций наблюдения, использованных для моделирования. Это приводит к значительным погрешностям в регионах их отсутствия (в высоких широтах, над океанами и т.д.). Кроме того, модель восстанавливает профиль только до высоты 2000 км, что неприемлемо для наших задач. Поэтому необходимо каким-то образом достраивать полученный профиль до необходимых

высот (используя некоторую аппроксимацию).

2. Модель IRI-Plas

Эмпирическая модель IRI-Plas (International Reference Ionosphere and Extensions to Plasmasphere) является расширением модели IRI, которую дополнили плазмосферной частью профиля, чтобы рассчитывать Ne до высот навигационных и геостационарных спутников [79,80].

В работе [81] детально описаны преимущества модели IRI-Plas, основными из которых являются включение плазмосферной части N(h)-профиля и возможность коррекции модели по значениям полного электронного содержания ионосферы.

3. Модель NeQuick

Эмпирическая модель NeQuick, предназначенная для обеспечения работы системы Galileo, делает акцент на вычисление полного электронного содержания вдоль траектории луча от спутника до приемника [82-84]. Входными параметрами являются географические координаты точки приема и момент времени. Как и в модели IRI-Plas, N(h)-профиль рассчитывается до высот ~20000 км. Также предусмотрена корректировка состояния ионосферы коэффициентом солнечной активности Rz. Расчеты можно проводить online на сайте <https://t-ict4d.ictp.it/nequick2/nequick-2-web-model>.

К недостаткам можно отнести низкое разрешение по времени (1 час), недостаточное внимание к модели нижней ионосферы.

4. Модель SIMP-1

Эмпирическая модель SIMP-1 (System of Ionosphere Monitoring and Prediction – Система мониторинга и долгосрочного прогноза месячного медианного состояния ионосферы) создана сотрудниками ИПГ и ИЗМИРАН [85,86] и основана на подходах модели NeQuick.

Поскольку при ее построении широко использовались данные спутников, ее отличает от других моделей меньшая погрешность в высоких широтах и в пунктах с отсутствием исходных данных, а также способность отражать более тонкую пространственную структуру поведения foF2 и hmF2.

К недостаткам, как и в модели NeQuick, можно отнести недостаточную проработку нижней области, слишком заметную дискретизацию в 1 час и отсутствие простого алгоритма коррекции по экспериментальным данным.

5. Комбинированная модель

Исходя из изложенных выше преимуществ и недостатков каждой рассмотренной модели, представляется необходимой попытка создания комбинированной модели, в которой были бы учтены преимущества и ослаблены или устранены недостатки базовых моделей. В качестве нижней ионосферы можно использовать модель IRI, в качестве верхней ионосферы - модель NeQuick. Кроме того, для определения параметров foF2 и hmF2 предлагается использовать модель SIMP-1.

1.2.2. Сравнение используемых моделей в конкретных условиях

В данном разделе проводится сравнение качества работы рассмотренных моделей в конкретных условиях. В качестве географической точки исследования был выбран п. Москва с координатами станции вертикального зондирования DPS-4 MO155 (55.5°N, 37.3°E). На рисунке 1.7 дается пример ионограммы, измеренной 29.01.2018 в 11.16UT, с указанием значений основных параметров ионосферы для этих условий.

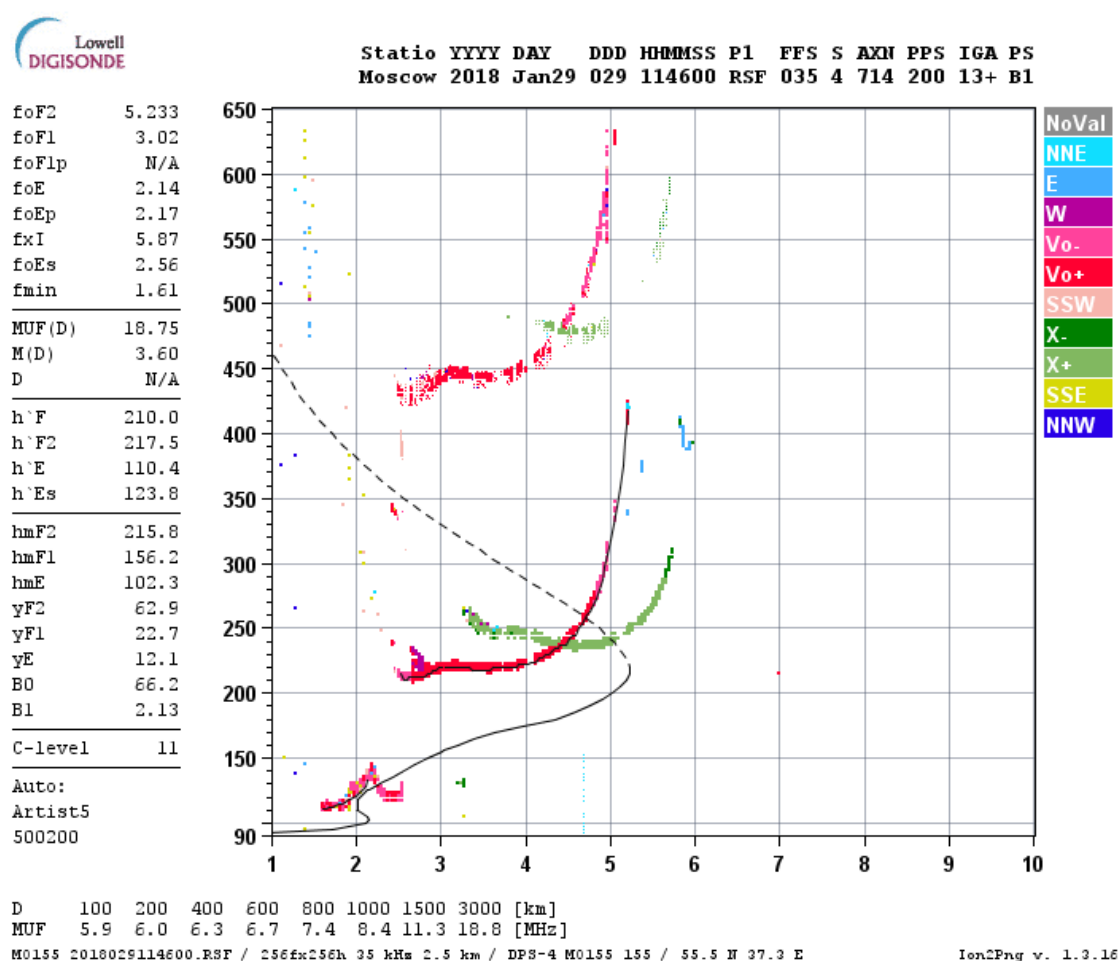


Рисунок 1.7 - Пример ионограммы, полученной ионозондом DPS-4 в п. Москва: сеанс 29.01.2018 в 11.46 UT

Рисунок 1.8 показывает плазменные профили выбранных моделей, соответствующие параметрам ионограммы рисунке 1.7.

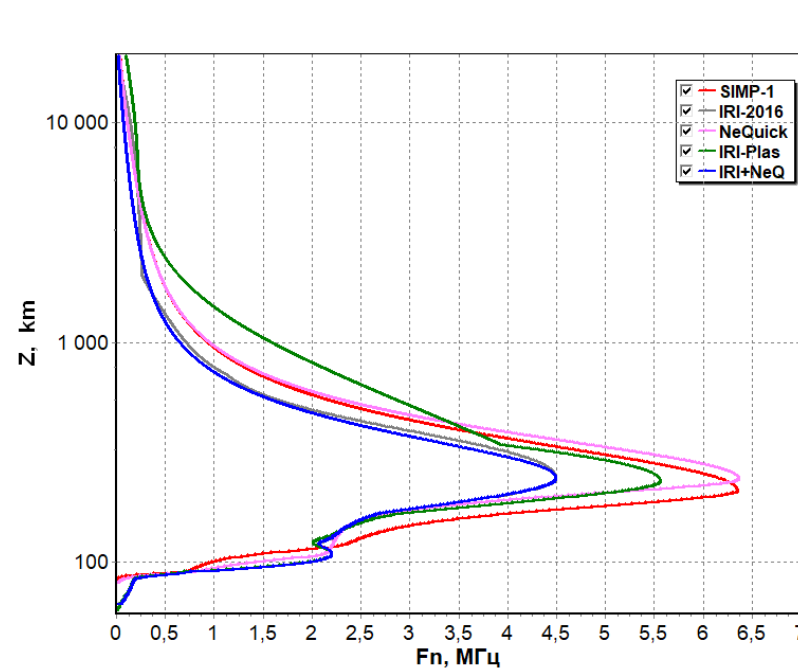


Рисунок 1.8 - Разнообразие профилей, построенных по параметрам ионограммы рисунка 1.7, п. Москва 29.01.2018 в 11.46 UT

Разница значений критической частоты f_oF2 составляет до 2 МГц, хотя форма профиля для всех моделей, за исключением IRI-Plas, близка.

На втором этапе аналогичные профили рассчитаны для моделей, скорректированных по данным ионограммы, и представлены на рисунке 1.9.

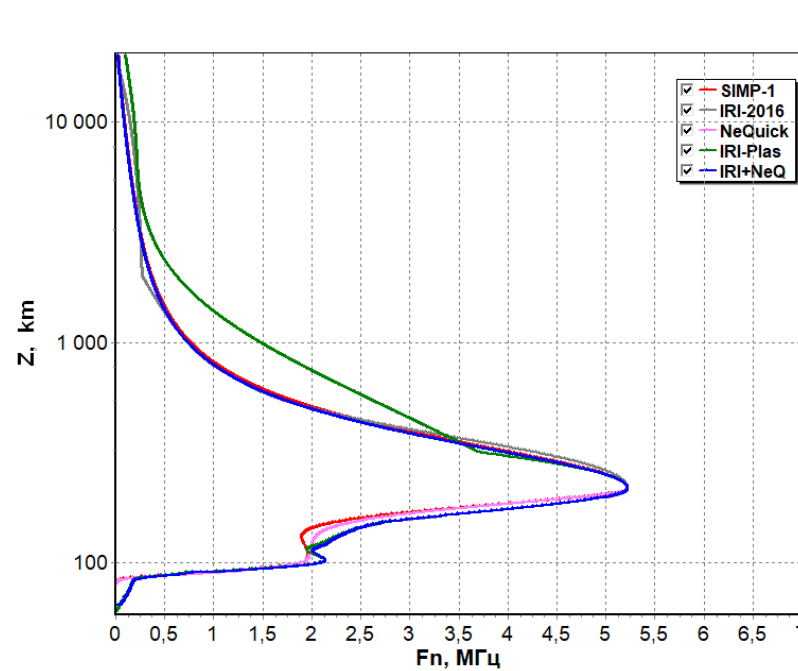


Рисунок 1.9 - $f_n(z)$ -профили для базовых моделей, скорректированных по данным ионограммы рис.1.7: п. Москва, сеанс 29.01.2018 11.46 UT

На рисунке 1.9 модель IRI-Plas сильно отличается от других моделей.

Все модели, кроме стандартных параметров ($foF2$, $hmF2$), рассчитывают полное электронное содержание (ТЕС) ионосферы. Рисунок 1.10 показывает результаты сравнения модельных ТЕС с экспериментальными значениями, взятыми на сайте Ionolab.org, в течение трех дней.

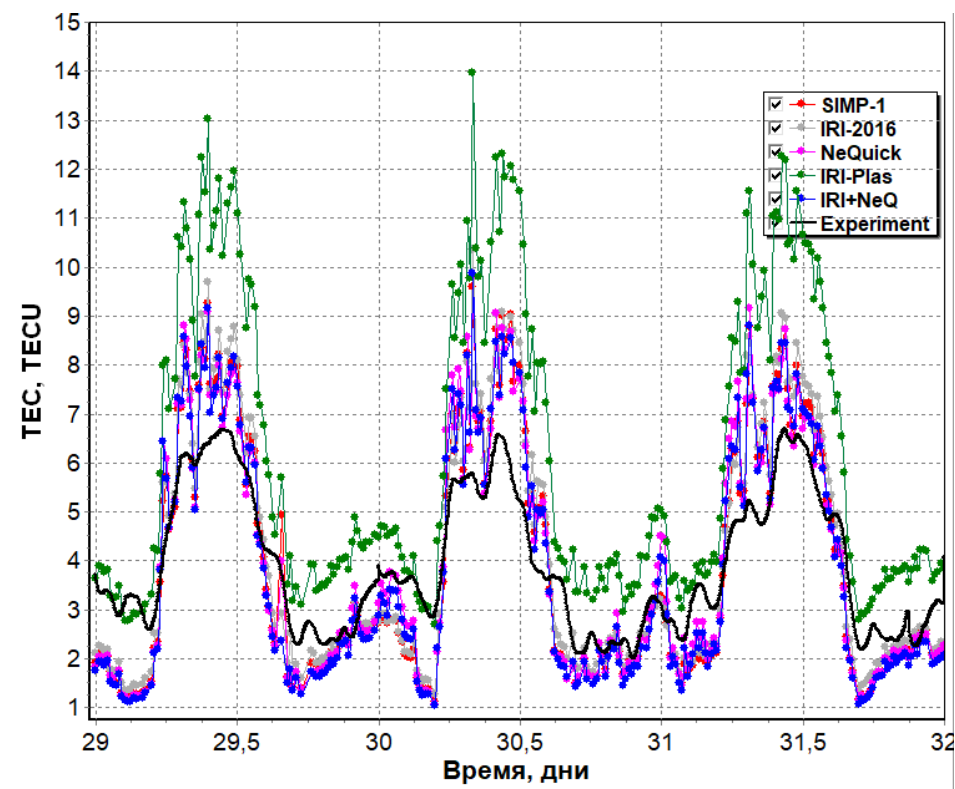


Рисунок 1.10 - Сравнение модельных ТЕС с экспериментальной кривой (черная линия), п. Москва, 29-31 января 2018

Модельные ТЕС близки к экспериментальным за исключением модели IRI-Plas, завышающей дневные значения ТЕС. Выбор конкретной модели может зависеть от дополнительных условий.

1.2.3. Пространственно-временная модель неоднородностей ионосферы

Как было сказано выше, в ионосфере практически постоянно присутствуют различные неоднородные структуры, влияющие на распространение радиоволн. Поэтому для задания корректной модели необходимо учитывать их наличие. В настоящей работе рассмотрены два основных типа неоднородностей: одиночные крупномасштабные и перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), расположенные на пути распространения луча.

В связи с этим ионосферную модель в общем случае трехмерно-неоднородной среды

удобно представить в виде:

$$N = N_0 \cdot (1 + \Delta N_1 + \Delta N_2), \quad (1.34)$$

где N_0 представляет «фоновую ионосферу» и соответствует регулярному профилю, слагаемое ΔN_1 представляет крупномасштабные неоднородные структуры, ΔN_2 относится к среднемасштабным неоднородностям (волновые возмущения).

Влияние крупномасштабных неоднородных структур на электронную концентрацию можно задать в виде суммы трехмерных эллипсоидов:

$$\frac{\Delta N_1}{N} = \sum_j \delta_j \cdot \exp \left[- \left(\frac{x - x_{0j}}{l_{Xj}} \cos \alpha \cos \beta \right)^2 - \left(\frac{y - y_{0j}}{l_{Yj}} \cos \alpha \sin \beta \right)^2 - \left(\frac{z - z_{0j}}{l_{Zj}} \sin \alpha \right)^2 \right] \quad (1.35)$$

с амплитудой δ , центром (x_0, y_0, z_0) и характерными масштабами l_x, l_y, l_z . Углы α и β определяют направление главной оси эллипса относительно используемой в расчетах системы координат.

ΔN_2 – слагаемое, описывающее влияние ПИВ. Его можно представить в виде волнового возмущения. Поскольку в большинстве случаев можно ограничиться двумя, для него предполагается модель в виде суммы плоских волн:

$$\Delta N_2 = \sum_i \delta_i(r, \theta, \varphi) \cos \left[- \frac{2\pi}{T_i} t + p_{ri}(r - R_0) + p_{\theta i} R_0 \theta + p_{\varphi i} R_0 \varphi + \Phi_{0i} \right], \quad (1.36)$$

где $\delta(r, \theta, \varphi)$ – зависящая от координат относительная амплитуда ПИВ с периодом T ;

$p_r = \frac{2\pi}{\Lambda} \cos \eta$, $p_\varphi = \frac{2\pi}{\Lambda} \sin \eta \cos \xi$, $p_\theta = \frac{2\pi}{\Lambda} \sin \eta \sin \xi$ – радиальная и горизонтальная составляющие волнового вектора ПИВ, Φ_0 – начальная фаза, Λ – длина волны, η – угол наклона направления движения ПИВ к горизонтали, ξ – угол между направлением движения ПИВ и направлением на север.

Для расчетов по формуле (1.36) используются следующие экспериментальные параметры: $50 \text{ км} < \Lambda_i < 100 \text{ км}$; $0,01 l_e < \delta_i < 0,1 l_e$; где $l_e = \exp \left[- \frac{|z - 200|}{100} \right]$.

В этом случае рассматривается система вложенных друг в друга неоднородностей плазмы. Такая модель надёжно установлена в эксперименте [10, 42, 87, 88] в отличие от модели с хаотически распределенными по пространству облаками плазмы различной концентрации.

В экспериментах были определены диапазон высот (от 50 до 1000 км) и размеры (от долей метра и больше) неоднородностей [2, 4-7, 38]. Кроме того, как и стандартные параметры, параметры мелкомасштабных неоднородностей сильно зависят от высоты,

географического положения, времени суток и сезона [2, 6, 7, 38], поэтому относительные возмущения $\Delta N/N$ можно приближенно описать анизотропным спектром [5, 6, 38, 89] в широком диапазоне масштабов:

$$F(\mathbf{k}) \propto \left[1 + \sum_{j=1}^3 (\kappa_j^2 / \kappa_{0j}^2) \right]^{-\mu/2} \exp \left[- \sum_{j=1}^3 (\kappa_j^2 / \kappa_{mj}^2) \right], \quad (1.37)$$

где $\mathbf{k}$ – волновой вектор неоднородностей, $\kappa_{0j} = 2\pi/l_{0j}$, $\kappa_{mj} = 2\pi/l_{mj}$, l_{0j}, l_{mj} – соответственно внешние и внутренние масштабы спектра.

Однако использовать такое представление в модели невозможно. Поэтому предлагается задавать их с помощью суммы достаточного числа волновых возмущений (1.36) с длинами волн $\Lambda_i < 20$ км. И это будет оправдано качественным воспроизведением влияния мелкомасштабных неоднородностей на распространение радиоволн.

Предлагаемый способ задания неоднородностей позволяет, с одной стороны, сохранить непрерывность распределения электронной концентрации, что вытекает из физического смысла, а с другой – комбинируя, получать неоднородную структуру различных видов и свойств.

В этом случае пространственно-временное распределение электронной концентрации можно представить формулой:

$$N = N_0 \left(1 + \sum_i \delta_i(r, \theta, \varphi) \cos \left[-\frac{2\pi}{T_i} t + p_{ri}(r - R_0) + p_{\theta i} R_0 \theta + p_{\varphi i} R_0 \varphi + \Phi_{0i} \right] + \sum_j \delta_j \cdot \exp \left(- \left(\frac{x - x_{0j}}{l_{xj}} \cos \alpha \cos \beta \right)^2 - \left(\frac{y - y_{0j}}{l_{yj}} \cos \alpha \sin \beta \right)^2 - \left(\frac{z - z_{0j}}{l_{zj}} \sin \alpha \right)^2 \right) \right). \quad (1.38)$$

В дальнейших расчетах при решении конкретных задач данную формулу можно упрощать: не снижая общности – переходить к двумерно-неоднородной задаче или опускать один из типов неоднородностей.

1.2.4. Модель регулярного профиля ионосферы вдоль траектории распространения волны

Для моделирования распространения радиоволн на каждом шаге расчета необходимо вычислять значение электронной концентрации в текущей точке и, как минимум, ее первые производные. Наиболее простой способ – каждый раз вызывать модуль, описывающий выбранную глобальную модель, находить значение регулярного профиля N_0 и подставлять в (1.52), а производные искать численно. Но это приводит к большим временным затратам и скорость расчетов резко падает. Кроме того, численное определение производных также

приводит к неточностям, что сказывается на уменьшении шага интегрирования и, следовательно, дополнительном понижении скорости.

Поэтому для задания регулярного профиля N_0 будет использоваться следующий алгоритм, позволяющий обращаться к модулю расчета IRI-модели только в начале расчетов. В общем случае трехмерно-неоднородной среды с некоторым шагом (например, 50 км в горизонтальной плоскости и 2 км по высоте) задаем трехмерную решетку (ее точки называют узловыми). Потом по используемой модели насчитываем массив значений электронной концентрации N_0 в этих точках. Затем интерполяцией кубическими сплайнами рассчитываем N_0 в произвольной точке [90,91], учитывая, что значения в узловых точках должны удовлетворять требованию непрерывности функции и ее первых двух производных (см., например, [92]). Т.к. расстояние между соседними узловыми точками, как по горизонтали, так и по вертикали, малы, и изменение электронной концентрации регулярного профиля N_0 между ними незначительно (с большой степенью точности его можно считать практически линейным), то такой способ задания регулярной ионосферы является вполне правомочным.

С целью проверки данного утверждения было проведено сравнение моделирования траекторий наклонного распространения радиоволн при различных начальных условиях для обоих способов задания регулярной части электронной концентрации N_0 . Результаты расчетов показали практически полное совпадение траекторий. Разница по дальности распространения не превышала нескольких метров.

В случае распространения лучей в заданной плоскости трехмерная решетка преобразуется в двумерную с координатами (высота, расстояние от передатчика).

Аналогичным образом задаются и параметры магнитного поля Земли (направление вектора индукции геомагнитного поля, гирочастота f_H).

В основном, в дальнейших расчетах будет использоваться такой метод описания регулярного профиля ионосферы. В случае, когда по объективным причинам потребуется другой способ задания среды распространения, он будет описан дополнительно.

1.3. Выводы

В данной главе представлена методика моделирования, включающая алгоритмы расчета траекторий методом характеристик, в том числе с учетом особенностей решения уравнений для крутопадающих на ионосферу лучей. Детально описано решение граничной задачи. Особое внимание уделено численным методам интегрирования соответствующих уравнений. На примерах наклонного и трансionoсферного зондирования показано, что в

условиях изотропного приближения наиболее эффективным методом расчета является метод прогноза и коррекции ADAMS5. В то же время, в случае магнитоактивной среды целесообразно использовать методы RKF4(5) или DOPR5(4) во избежание затруднений решения вблизи точки отражения. Точность метода определяется задаваемой точностью решения граничной задачи: если точность задачи порядка 1 м, то точность метода должна быть 10^{-10} - 10^{-11} . Если точность задачи менее критична, то для любого из четырех выбранных методов можно ограничиться точностью порядка 10^{-6} - 10^{-7} . Альтернативный метод, основанный на вариационном принципе, не показал преимуществ перед методом характеристик. Анализ и тестирование современных глобальных эмпирических моделей ионосферы привел к решению, что предпочтительно использовать комбинированный вариант с $N(h)$ -профилем до высот навигационных спутников. Поскольку целью работы является учет неоднородных структур, была разработана соответствующая пространственно-временная модель для различных масштабов неоднородностей, используемая для решения задач применительно к различным типам зондирования.

Результаты главы опубликованы в работах [49,54,67,74,75,81,92-94] и были представлены на международных и всероссийских конференциях [95-100].

Глава 2. Методы обработки данных наземных ионозондов

Глава 2 посвящена решению проблем вертикального зондирования, к которым относятся: 1) наличие диффузных отражений, 2) существующие методы обработки ионограмм являются закрытыми коммерческими продуктами, что создает трудности для использования их результатов в дальнейших исследованиях, 3) наличие неоднородностей приводит к необходимости рассмотрения 3-х мерной задачи.

Еще в статье Эпплтона [101] была поставлена задача восстановления $N(h)$ -профиля по данным ионозондов.

Первыми и используемыми до сих пор являются два метода POLAN [102] и NhPC [103]. Эти методы требовали ручной оцифровки "О"-следа и аппроксимировали $N(h)$ -профиль набором аналитических функций. В то время как ручная оцифровка, т.е. участие оператора при подготовке данных, являлась большим недостатком, как и использование изотропной ионосферы. Первый недостаток был преодолен с помощью процедуры автоматизации AutoScala [104], включенной в настоящее время в ионозонд «Парус-А».

Использование современных компьютеров для автоматизации процесса оцифровки обеспечивает достаточную близость к реальному $N(h)$ -профилю, уменьшаются ошибки моделирования, повышается качество информации [105-108].

Этим требованиям удовлетворяют современные цифровые ионозонды Digisonde и Dynasonde-21. Для Digisonde разработана система ARTIST [104,108,110]. В Dynasonde-21 используется алгоритм "NeXtYZ" [12,13,111,112]. Примером является российский сетевой ионозонд «ТОМИОН» [113].

Следует указать, что реализация алгоритмов ARTIST и NeXtYZ требует выполнения определенных условий техники зондирования, например, получение таких физических характеристик каждого отраженного сигнала, как направление луча и его фаза, которые пока не могут быть обеспечены на большинстве ионозондов в нашей стране.

2.1. Разработка методов расчетов Nh-профилей ионосферы из сложных ионограмм, полученных в результате системного радиозондирования

В работе [114] разработаны два новых метода восстановления $N(h)$ -профилей по ионограммам, которые обладают большими возможностями, в частности, их определенная модификация позволит автоматизировать расчет $N(h)$ -профилей и тем самым увеличить точность определения параметров ионосферы. Это очень важно для использования сетевого ионозонда в качестве исследовательского. Этот подход иллюстрируется с помощью данных

ионосферной станции Москвы (55°28' с.ш., 37°18' в.д.), оборудованной ионозондом «Парус». Необходимо отметить, что предлагаемые методы имеют важное отличие, которое заключается в учете магнитного поля.

Моделирование проводится методом характеристик, описанным в предыдущей главе.

Также предлагаемые методы различаются способом использования ионограмм: 1) ее нескольких базовых точек, 2) всей оцифрованной.

Конкретные цели определяют достоинства каждого метода.

2.1.1 Метод восстановления профиля по нескольким базовым точкам ионограммы

В основе расчета профиля по базовым параметрам ионограммы лежит использование модели IRI и необходимость иметь следующие параметры:

- 1) координаты станции наблюдения (широта, долгота);
- 2) дату и время наблюдения;
- 3) критическую частоту О-компоненты слоя F2 (f_oF2 , МГц);
- 4) действующую высоту следа отражений О-компоненты на частоте, равной $0,834 \cdot f_oF2$ (h_pF2 , км);
- 5) дополнительную реперную частоту слоя F ($f'F$, МГц);
- 6) действующую высоту отражения от слоя F на частоте $f'F$ ($h'F$, км);
- 7) критическую частоту О-компоненты слоя E (f_oE , МГц);
- 8) наименьшую частоту, при которой на ионограмме наблюдаются следы отражений от ионосферы (f_{min} , МГц);
- 9) действующую высоту на минимальной частоте f_{min} ($h'_{min}E$, км);
- 10) критическую частоту О-компоненты слоя F1 (f_oF1 , МГц).

Первые 6 параметров являются стандартными и обязательными. Остальные нужны в присутствии отражений от указанных слоев.

Способность модели IRI [66] восстанавливать профиль по значениям некоторых параметров определяет идеологию данной процедуры. Параметры могут быть априорными или заданными пользователем.

В данном случае это: f_oE , h_mE , f_oF1 , f_oF2 , h_mF2 , индексы RZ12, IG12, Ap.

Однако в силу формального использования индексов (IG12, RZ12, Ap) в соответствии со статьей авторов модели IRI [78] они заменяются полутолщиной B0 и степенью B1 формы слоя F2.

Для подбора наиболее точного профиля по этим параметрам был разработан алгоритм, включающий:

1. Задание значений критических частот всех слоев, присутствующих на ионограмме. При отсутствии отражения от какого-либо слоя его частота выбирается из модели IRI.

2. Задание минимальной частоты отражений f_{min} и действующей высоты отражения $h'_{min}E$ при наличии слоя E. Вариацией hmE при траекторном моделировании можно получить совпадение расчетного и экспериментального значений $h'_{min}E$.

3. Задание действующей высоты h_pF2 следа O-компоненты на частоте, равной $0,834 \cdot f_oF2$, для слоя F2 и дополнительно действующей высоты отражения O-луча на частоте $f'F$ из слоя F2 для включения параметров B0 и B1. Это дает систему из двух уравнений, решение которой позволяет получить модельный профиль, для которого совпадают расчетные и экспериментальные $h'F$, а сам профиль лучше соответствует реальному.

Таким образом, имеем все параметры для построения модели IRI ионосферы для условий, близких к реальным. Качество работы модели определяется сравнением модельной и экспериментальной ионограмм.

В результате можно констатировать следующие достоинства данной модели:

- минимальный набор исходных данных, не требующий дополнительных действий оператора ионозонда даже при существующих способах обработки;
- восстановление N(h)-профиля на низких высотах до 100 км, где данные отсутствуют;
- высокую скорость расчета;
- возможность использования в автоматическом режиме совместно с уже существующим оборудованием ионозондов, например «Парус-А» или DPS-4;
- отражение полученным профилем невозмущенного «базового» состояния ионосферы в текущий момент, исключая влияние случайных мелкомасштабных неоднородностей.

Однако, кроме достоинств, модель имеет и существенный недостаток: она не учитывает влияние возмущений, практически постоянно присутствующих в ионосфере. Это может привести к расхождению между реальным состоянием ионосферы и моделью.

Примеры расчета по программе, реализующей данный метод восстановления N(h)-профиля, даны на рисунках 2.1 и 2.2 для случаев присутствия отражений от различных слоев (слои E, F1, F2), отражающие результаты работы ионозонда «Парус» для ст. Москва. В принятом приближении горизонтально-однородной ионосферы действующая дальность R' на ионограммах соответствует действующей высоте отражения h'.

Для представления о качестве соответствия приведены аналогичные следы, полученные путем моделирования с учетом модифицированного профиля.

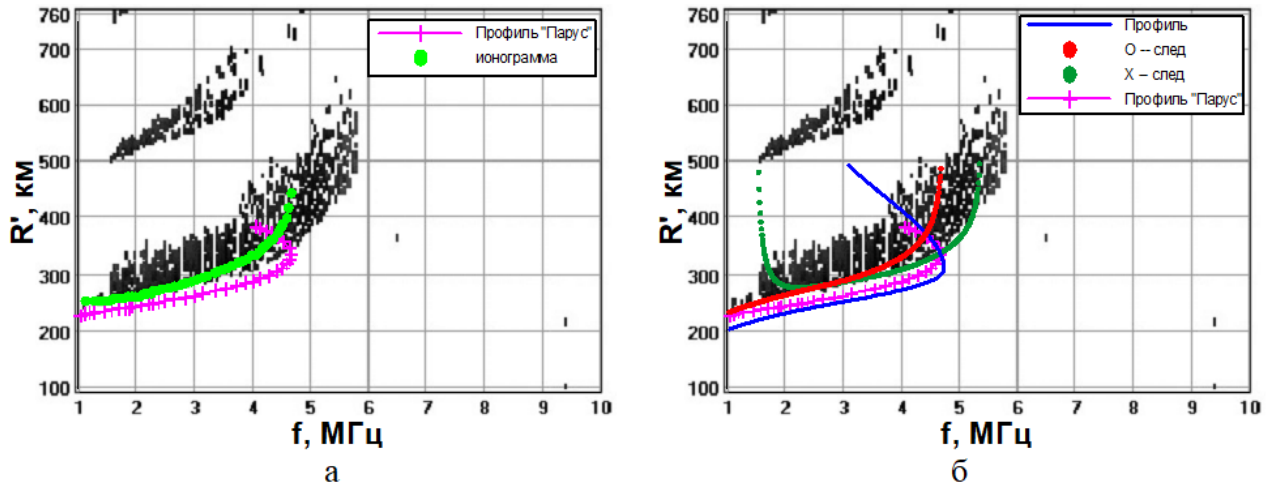


Рисунок 2.1 - Экспериментальные ионограммы вместе с N(h)-профилями, рассчитанными: (а) методом ионозонда «Парус», (б) по нескольким базовым параметрам для сеанса 11.10.2011, 21:45

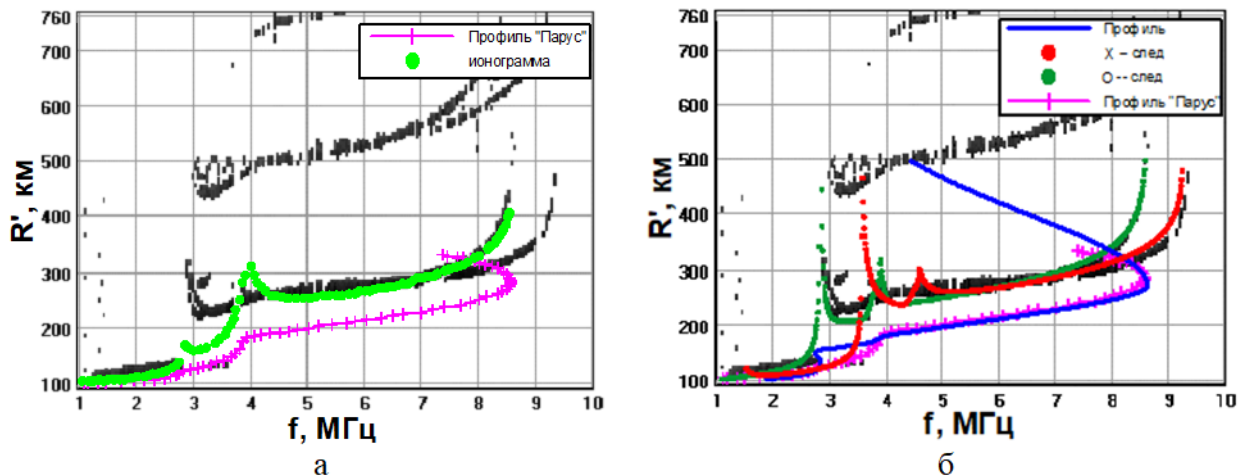


Рисунок 2.2 - То же, что и рисунок 2.1 для сеанса (12.10.2011, 07:00). Случай трех слоев

Левые ионограммы показывают N(h)-профиль и модельный след для изотропной ионосферы, рассчитанный программой «Парус». Правая ионограмма дополнена модифицированным профилем и следами О- и Х-лучей для этого профиля.

Можно отметить, что полного соответствия между модельной и экспериментальной ионограммами на рисунке 2.2 нет.

В работах [115, 116] показано, что метод хорошо подходит для случая нескольких ионозондов и коррекции модели во всей выбранной области. Ионосферные параметры вычисляются в месте расположения каждого ионозонда, а в «опорных» точках они вычисляются интерполяцией по точкам ионозондов, позволяя восстановить профиль.

2.1.2 Метод восстановления профиля по оцифрованной ионограмме вертикального зондирования

В этом разделе представлен метод восстановления профиля по следу о-компоненты, однако алгоритм инвариантен относительно выбора магнито-ионной компоненты. Иногда след х- компоненты бывает выражен четче, тогда можно использовать его, учитывая знак в формуле Эпплтона – Хартри. В областях с отсутствием отражений (ниже f_{min} и долина) традиционно используются модели. Это может быть модель IRI или любая другая, например, SIMP-1 [86] или модель Титтериджа [117].

При разработке метода сделаны предположения:

- об отсутствии ошибок для введенных параметров и отраженных сигналах,
- о вертикальном распространении сигналов.

Условно вся область ионосферы разбивается на четыре участка:

- 1) с отсутствием отражений ($f < f_{min}$, долина E-F);
- 2) которые обеспечивают легко определяемые действующие высоты следа;
- 3) от которых действующую высоту трудно определить (район максимума слоев E и F);
- 4) $h > h_m F2$.

Каждый участок обрабатывается различными методами.

1. Участки, где не существует наблюдаемых отражений

Как уже указывалось, что в качестве начального приближения необходимо использовать модель IRI (или любую другую). Выбираем шаг дискретизации профиля равным 1 км. Зафиксировав частоты в этих узловых точках, варьируя расстояние между ними, приходим к необходимости решения обратной задачи относительно значений действующих высот двух первых частот в оцифрованном следе, следующих за этой областью, полученных по ионограмме. Полученный участок профиля можно считать наиболее близким к реальному. Для обеспечения непрерывности профиля и его первой производной, необходимых для траекторных расчетов, в промежутках между узловыми точками проводится интерполяция с помощью кубического сплайна. Использование двух точек достигается лучшая гладкость профиля в точке перехода от участка одного типа к другому.

2. Участки, для которых действующие высоты определяются достаточно точно

Здесь используется принцип постепенного восстановления отрезков кусочно-линейного профиля для небольших интервалов частот при линейной аппроксимации на интервалах порядка 0,05–0,1 МГц. На каждом шаге метод учитывает, что ионосфера уже определена ниже исследуемого частотного отрезка, и сопоставляет измеренную h' с

модельным эквивалентом. Минимизацией разницы получается следующая высота. В промежутках используется интерполяция кубическим сплайном. Это показывает независимость результата от модели, а только от значений действующих высот.

3. Участки ВЧХ вблизи частоты максимума слоев E и F

Здесь возникают трудности точного определения действующей высоты отражения из-за ее быстрого роста, приводящего к сильной задержке. Математически в точке самого максимума она стремится к бесконечности, поэтому применять описанный метод не совсем корректно. Выход существует в описании профиля в окрестности максимума слоя с помощью модели Чепмена [118].

4. Участок выше максимума области F2

Этот участок может быть описан двумя способами:

- скорректированной моделью IRI;
- чепменовской аппроксимацией выше максимума слоя F2.

Несмотря на то, что оба способа имеют достоинства, предпочтение отдано второму.

Таким образом, оказалась построенной модель всего профиля.

В качестве достоинств этой модели можно отметить:

- восстановление $N(h)$ -профиля ниже 100 км;
- возможность учета нюансов ионограммы, важных при исследовании нестандартных случаев;
- сравнительно высокую скорость расчета;
- очень слабую зависимость от эмпирической модели;
- наличие перспектив развития метода.

Среди недостатков можно выделить:

- отсутствие возможности использования в автоматическом режиме на имеющемся оборудовании ионозондов;
- сильная зависимость от качества ручной оцифровки ионограммы.

Подобно рисункам 2.1-2.2, рисунки 2.3-2.5 демонстрируют применение метода для случаев различного числа слоев. Качество рассчитанных $N(h)$ -профилей можно определить по следам модельных ионограмм для этих профилей.

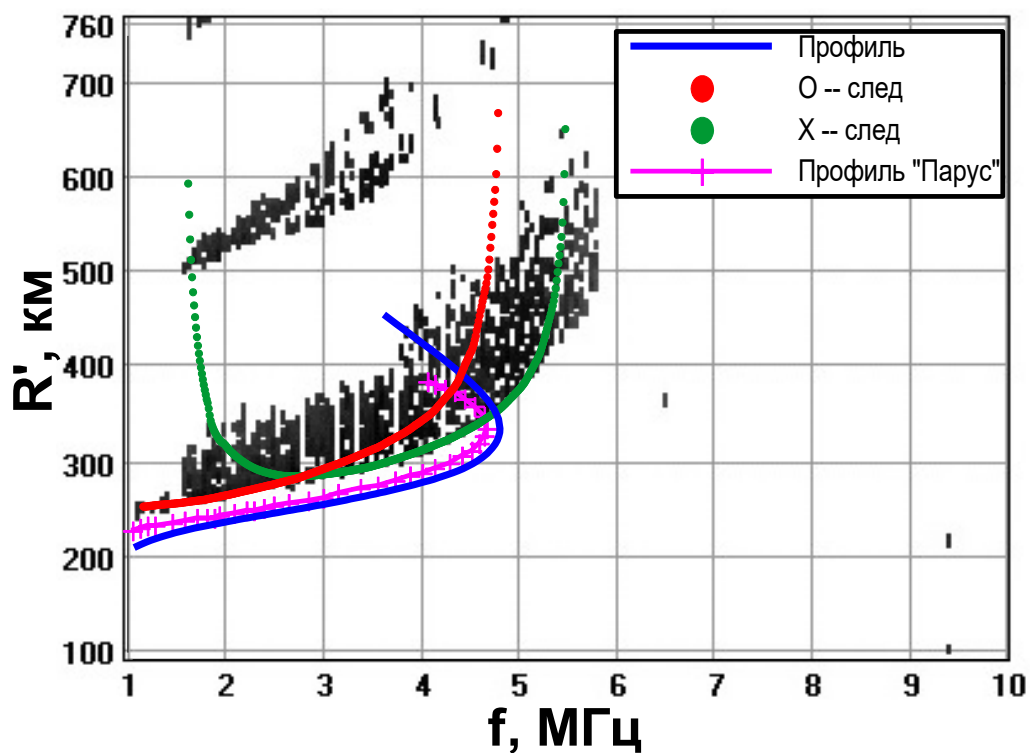


Рисунок 2.3 - Иллюстрация метода восстановления для сеанса (11.10.2011, 21:45 UT) для сравнения экспериментальных и модельных следов. Случай одного слоя

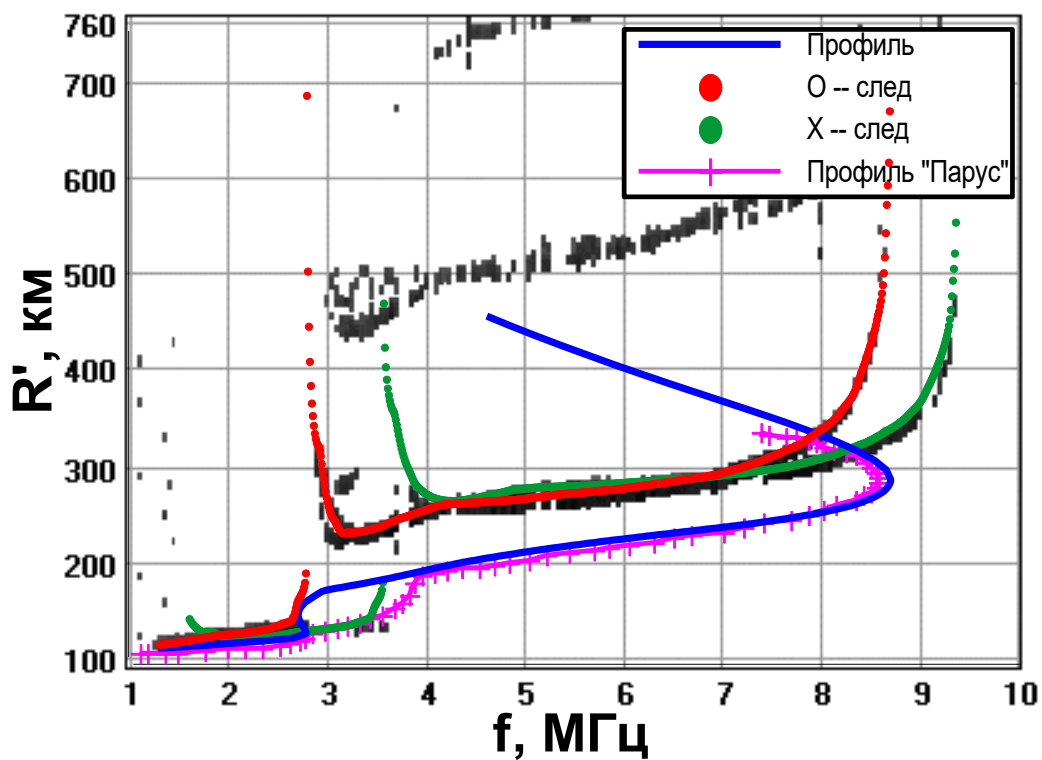


Рисунок 2.4 - Иллюстрация метода восстановления для сеанса (12.10.2011, 07:00 UT) для сравнения экспериментальных и модельных следов. Случай двух слоев

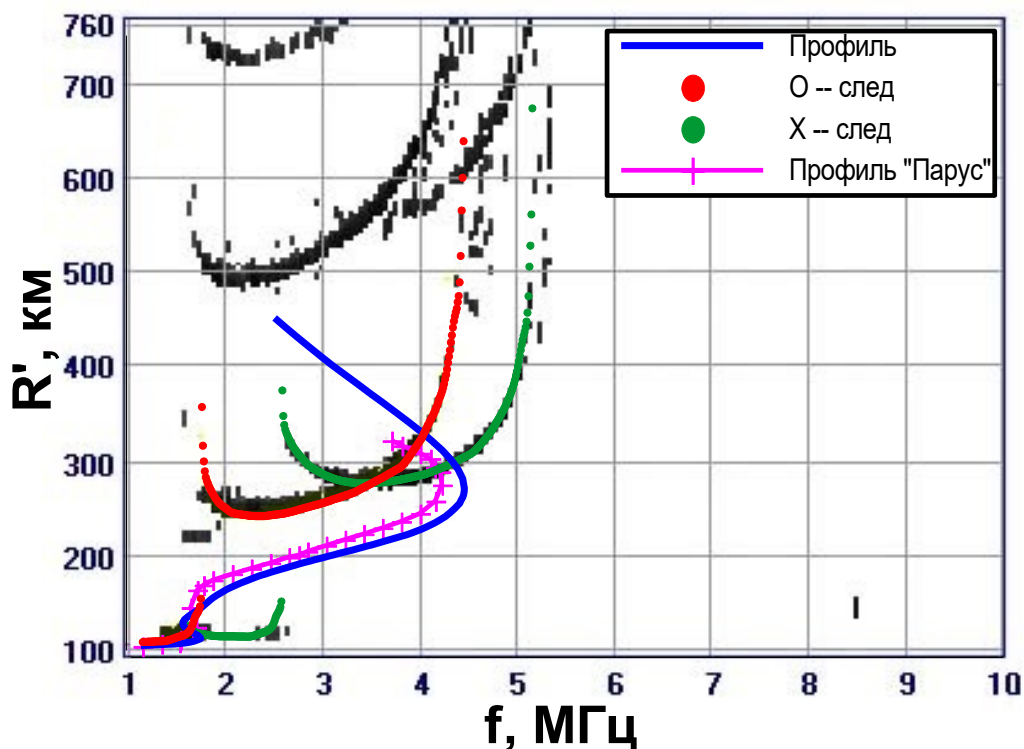


Рисунок 2.5 - То же самое, что рисунок 2.4, для сеанса (05.10.2011, 03:45 UT)

В этих случаях сравниваются: 1) профиль «ПАРУСа», 2) профиль, рассчитанный по описанной методике, 3) модельные О- и Х-следы для этого профиля. Практически полное совпадение следов, в том числе для Х-компоненты, не участвовавшей в расчетах, говорит о корректности метода. Более того, из рисунков 2.4 и 2.2 видна ошибка комплекса «ПАРУС» при интерпретации слоя F1 с максимумом на частоте 3,8 МГц.

Также важно отметить, что профили, рассчитанные по описанной методике, иногда имеют меньшие высоты, чем профили «ПАРУСа», потому что метод «ПАРУСа» игнорирует нижележащие слои (D- и частично E-области) несмотря на то, что они могут играть большую роль.

Покажем, что данный метод хорошо работает даже с сильно зашумленными ионограммами. Сделаем это на примере ионограмм, полученных на ионозонде DPS-4, установленном на ионосферной станции Тромсё (69.58° с.ш., 19.12° в.д.).

На рисунке 2.6а показана ионограмма, полученная 05.05.2016, UT=00:30. На рисунке тонкой черной линией приводится N(h)-профиль, рассчитанный программой ARTIST-5, более толстой – профиль, восстановленный по описанному методу. На рисунке 2.6б представлена аналогичная ионограмма, полученная на том же ионозонде 14.05.2013г., UT=00:45.

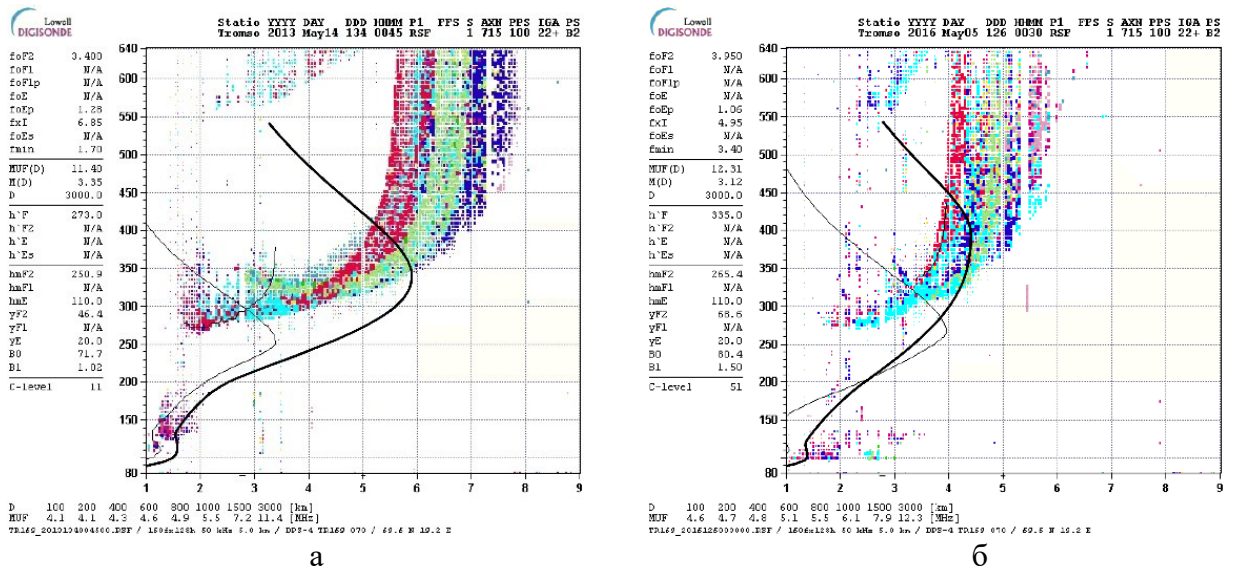


Рисунок 2.6 - Реальные зашумленные ионограммы ионозонда DPS-4 (п.Тромсё) в двух сеансах 05.05.2016г. (а) и 14.05.2013г. (б) вместе с N(h)-профилями, восстановленными программой ARTIST-5 (тонкая черная линия) и предлагаемым методом (более жирная линия)

Рисунок 2.6 дает представление о возможности применения данного метода к сложным зашумленным ионограммам, когда не работают автоматические процедуры (например, ARTIST-5).

Необходимо отметить большие возможности восстановления профиля по оцифрованной ионограмме для развития метода. Главное – это автоматизация, позволяющая рассчитывать не только профиль, но и его статистические характеристики. А, если сюда добавить оценку ошибок и определение дополнительных параметров, то можно использовать традиционный ионозонд как «исследовательский». При этом, модернизация аппаратной части ионозондов типа «ПАРУС» должна включать разделенный компонент для повышения точности расчета h' .

Одной из возможностей развития метода восстановления профиля по оцифрованной ионограмме может быть его участие в комбинированном методе совместно с методом восстановления по базовым параметрам ионограммы с использованием модели IRI, чтобы сочетать преимущества обоих. Такое сочетание позволило получить точное описание реального состояния ионосферы.

Разработанные алгоритмы реализованы в виде программ, для которых получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [119]. Результаты, полученные с использованием этих программ, представлены кроме данной работы в статьях [114-116].

2.1.3 Метод восстановления $N(h)$ -профиля по экспериментальным данным внешнего зондирования

Идеологию, описанную в предыдущем разделе, можно применить для восстановления ионосферного профиля электронной концентрации с использованием спутниковых ионограмм внешнего зондирования.

Прежде всего, нужно указать на отличия случая ионограмм внешнего зондирования от случая ионограмм наземного зондирования.

Первая точка искомого профиля – это значение плазменной частоты на высоте спутника. Поскольку до высоты максимума слоя F2 профиль является непрерывной кривой, до высоты максимума работает линейная аппроксимация на интервалах порядка 0,05–0,1 МГц. Для конечной частоты отрезка задается более низкая высота, а высота частоты конца отрезка получается минимизацией разницы между измеренной действующей высотой и модельной действующей высотой. Затем минимизацией разницы между измеренной действующей высотой и ее модельным эквивалентом получается искомая высота частоты конца отрезка. И так до высоты максимума, в области которой, как и в предыдущем случае, используется аппроксимация слоем Чепмена. По формуле этого слоя профиль рассчитывается для полученных значений $foF2$ и $hmF2$, а вариацией дополнительных параметров минимизируется разница между измеренной действующей высотой земного следа и модельной.

Примеры расчетов $N(h)$ -профилей по предложенной методике из экспериментальных ионограмм будут представлены в последующих разделах.

2.2. Программный комплекс «Viewer_DPS4» – инструмент обработки и анализа данных ионозонда DPS-4

С момента своего создания 100 лет тому назад ионозонды (станции вертикального зондирования ионосферы) являются основным средством изучения ионосферы. И, если на начальном этапе в их функцию входила только регистрация ионограмм (высотно-частотных характеристик ВЧХ) и съем информации вручную, то современные ионозонды снабжены программным обеспечением для автоматической обработки ионограмм. Более того, они позволяют измерять дополнительные характеристики, например, тип поляризации, углы прихода, мощность отраженного эхо, доплеровский сдвиг частоты.

В настоящее время наиболее распространенными являются ионозонды серии «Дигизонд» или DPS-4 [120]. Они позволяют измерять все перечисленные выше

дополнительные характеристики, потому что снабжены автоматизированными системами обработки и интерпретации.

Для ионозонда DPS-4 такой системой является программный комплекс «ARTIST-5» [109,110]. Однако эта система имеет ряд ограничений: 1) отсутствие автоматической обработки цветного изображения, 2) трудность получения сведений из графического представления результатов (режим наблюдений), 3) отсутствие учета особенностей реальной ионосферы в процедуре «SkyMap» (исследовательский режим), 4) закрытые коды «ARTIST-5». Эти ограничения не позволяют модернизировать эту программу.

Поэтому целью диссертации в этом разделе является создание программного комплекса с выводом изображений на экран, т.е. программный комплекс «Viewer_DPS4», и детальное исследование характеристик неоднородностей ионосферы.

Описываются реализованные программные продукты, в которых преодолены отмеченные ограничения: 1) в режиме наблюдений это относится к модулю «Fspread-18», 2) в исследовательском режиме это относится к модулю «LocalDrift».

Эти особенности отличают модуль от стандартной процедуры.

В последующих разделах дается детальное описание функциональных возможностей комплекса.

2.2.1. Основные характеристики ионозонда DPS-4 и его режимов работы

На рисунке 2.7а показана схема расположения приёмной системы из 4-х разнесённых антенн, которая является одной из важных частей ионозонда DPS-4. Каждая антенна – это скрещенные рамки с усилителем-переключателем поляризации, принимающие только «обыкновенную» (или «необыкновенную») волну.

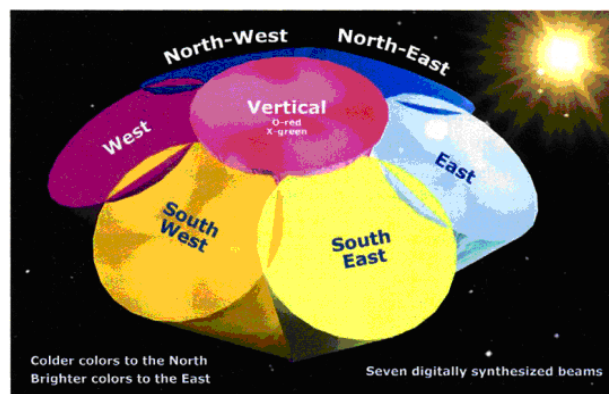
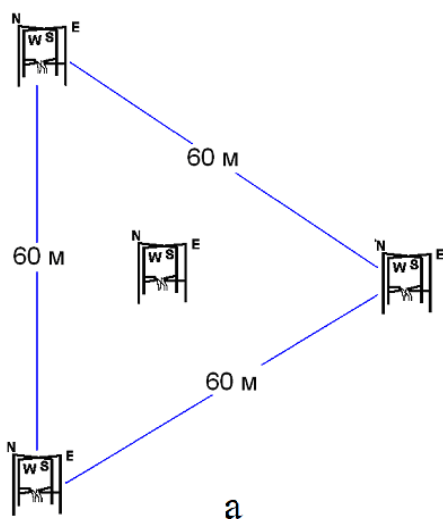


Рисунок 2.7 - Расположение рамочных антенн приёмной системы (а) и 7-ми синтезированных диаграмм направленности (б)

Для определения углов прихода радиоволн используются амплитуды и фазы сигналов с 4-х антенн, потому что в ионозонде DPS-4 реализованы два способа оценки углов прихода: амплитудный и фазовый, они же определяют два режима работы ионозонда.

Снятие ионограмм осуществляется программной перестройкой по частоте. Это – основной режим, который использует штатное программное обеспечение DPS-4. На рисунке 2.7б показаны семь диаграмм направленности.

Для сохранения результатов используются файлы форматов SAO и RSF. Подробная информация о структуре файлов и данных содержится в [120].

На рисунке 2.8 приведена ионограмма для сеанса LT=11:01 01.01.2018, на которой разные цвета соответствуют разным углам прихода в зависимости от типа отражения (О- или Х-). Слева даются значения параметров слоев, внизу для 9 значений длин трассы (D) даются МПЧ (MUF). Сплошной линией показан N(h)-профиль программы «ARTIST-5». Однако получение дополнительных сведений затруднительно. Поэтому был создан программный комплекс, выводящий информацию на экран.

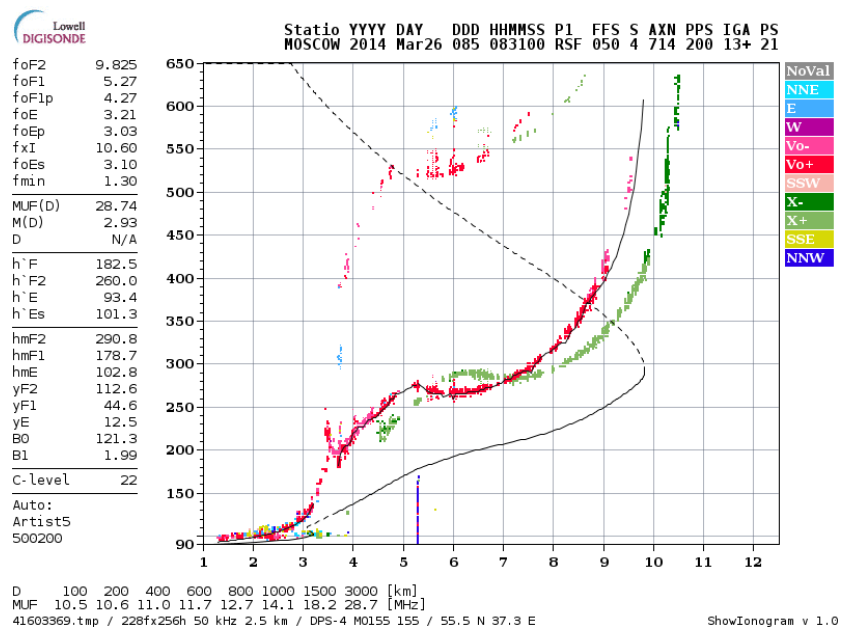


Рисунок 2.8. Ионограмма ионозонда DPS-4, построенная программой «ARTIST-5»

Исследовательский режим «SkyMap» предполагает работу ионозонда с набором фиксированных частот и сохранение полученных данных в файле формата DFT. Помимо общих эти данные включают:

- фазы отраженного сигнала, принятого на каждой приемной антенне;
- уровень мощности сигнала;
- доплеровское смещение частоты;
- действующую высоту отражения.

Реализация разнесенного приема позволяет измерять вертикальный θ и азимутальный ψ углы прихода отраженной волны, вычисляемые через фазовые сдвиги сигналов в разнесенных антеннах в предположении прямолинейного распространения луча.

Контроль точности определения углов осуществляется невязкой между измеренными сдвигами фазы сигналов на каждой антенне относительно центральной антенны и сдвигами точки отражения.

2.2.2. Возможности программного комплекса «Viewer_DPS4» в режиме наблюдений

В рамках программного комплекса «Viewer_DPS4» разработан модуль «Fspread-18» для автоматического определения параметров F-рассеяния.

Рисунок 2.9 показывает соответствующее отображение: слева выводятся рабочий каталог, кнопки навигации и выбора ионограмм, информация программы «ARTIST-5». В нижней части дается главный новый результат, содержащий характеристики F-рассеяния, которые рассматриваются в следующем разделе.

А пока можно отметить, что рисунок 2.9 представляет две вкладки «Ионограмма_SAO» («а») и «Ионограмма_SAO-RSF» («б»). Вкладка «Ионограмма_SAO» содержит основной след и N(h)-профиль программы «ARTIST-5» (рисунок 2.9а).

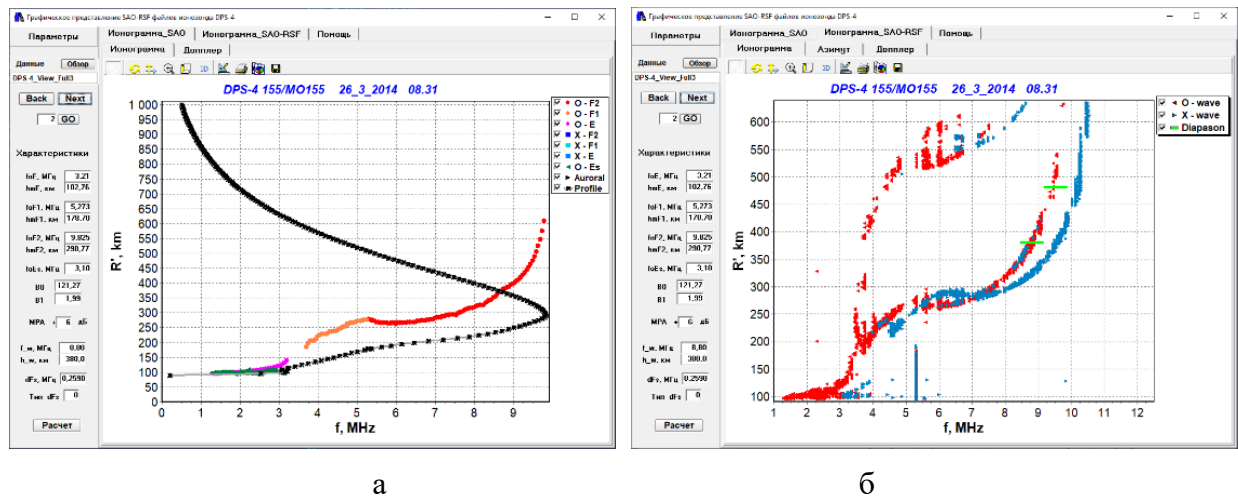


Рисунок 2.9 - Иллюстрация работы модуля «Viewer_DPS4» при оцифровке основного следа и построения его N(h)-профиля (а), при отображении действующих высот раздельно по магнитоионным компонентам (б)

Вторая вкладка «Ионограмма_SAO-RSF» содержит все отражения, которые распределены по трем элементам «Ионограмма», «Азимут» и «Допплер». Слева дается параметр МРА – порог отображения следа, позволяющий исключать определенные сигналы. Рисунок 2.9б отображает отдельно действующие расстояния двух магнитоионных компонент. Горизонтальные отрезки, отмеченные зеленым цветом, показывают области F-рассеяния. Важными являются дополнительные графики, представляющие направление

прихода каждого сигнала и его доплеровскую характеристику. Это является следствием реализации больших возможностей модуля «Viewer_DPS4».

2.2.3. Автоматизированная процедура расчета F-рассеяния по данным ионозонда DPS-4

Представленная ниже автоматизированная процедура «Viewer_DPS4» расчета F-рассеяния предназначена для распознавания случаев наличия рассеянных компонент в спектре сигналов, вызванных движением неоднородностей, которые затрудняют определение стандартных ионосферных параметров f_oF2 , f_xF2 , h_mF2 .

F-рассеяния различаются по интенсивности, для оценки которой существует балльная классификация (от 0 до 3). Балл 0 присваивается F-рассеянию, если ширина следа < 0.25 МГц, что принимается за отсутствие рассеяния. Балл 1 присваивается F-рассеянию, если ширина одного из следов («О» или «Х») превышает 0.25 МГц, но меньше 0.5 МГц. Балл 2 присваивается, если ширина следа составляет от 0.5 МГц до 0.75 МГц. Балл 3 присваивается, если ширина следа превышает 0.75 МГц. Такая классификация позволяет довольно четко сортировать данные и проводить их сравнение. Методика определения наличия/отсутствия F-рассеяния (рисунок 2.10) использует принцип «да»/«нет» на примере типичных ионограмм DPS-4 со следом «О-» компоненты (слева) и «Х-компоненты» (справа). Прямоугольниками выделены участки с уширением следа $\Delta f \geq 0.25$ МГц, являющимся критерием появления F-рассеяния. Деления по оси x составляют 1 МГц, по оси y – 50 км.

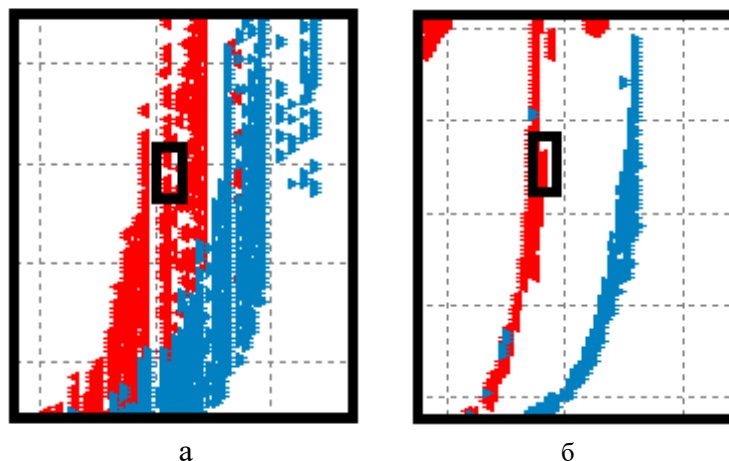


Рисунок 2.10 - Вид типичных ионограмм: (а) при наличии F-рассеяния, (б) при его отсутствии

Выделение признаков F-рассеяния проводится автоматическим разделением сигналов на «О»- и «Х»-компоненты, используя набор действующих высот, показанных горизонтальными отрезками на рисунке 2.9б. На рисунке 2.9а точкой показано задание начальных высот. При учете F-рассеяния появляется важная характеристика – уширение следа (относительно положения основного следа), для которого определяется среднее значение dFs (в МГц).

Частота и действующая высота начала диапазона измерений, тип F-рассеяния и dFs выводятся на общую панель.

Результаты автоматической обработки данных

На рисунках 2.11, 2.12 приведены результаты обработки (рисунок 2.11) и сами ионограммы с F-рассеянием баллом 0 (рисунок 2.12а) и баллом 2 (рисунок 2.12б). В наших примерах из рисунка 2.12 видно, что базовая высота $H_0 = 370$ км для рисунка 2.12а и 415 км для рисунка 2.12б. Кроме того, на этом рисунке зелёными горизонтальными линиями отмечен рабочий интервал высот Δh , связанный с H_0 соотношением $\Delta h = [H_0+10; H_0+110]$. На первом рисунке 2.12 он равен $\Delta h = [380; 480]$ км, на втором $\Delta h = [425; 525]$ км.

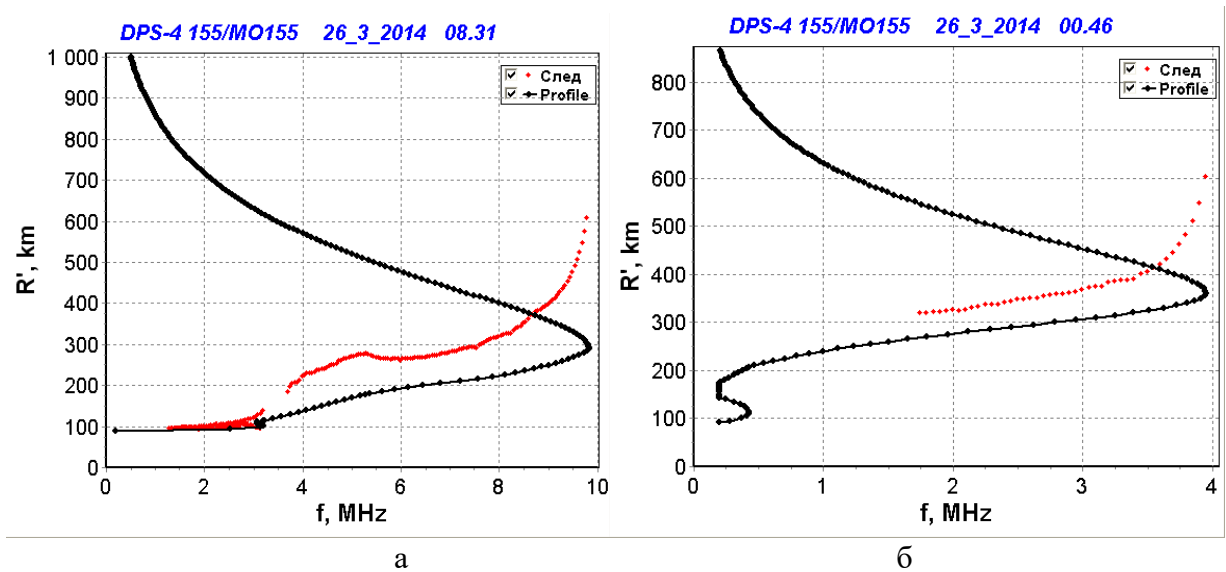


Рисунок 2.11 - Различные случаи обработки ионограмм DPS-4 в SAO-формате: красные точки показывают след «О»-компоненты, черная линия – рассчитанный – его профиль

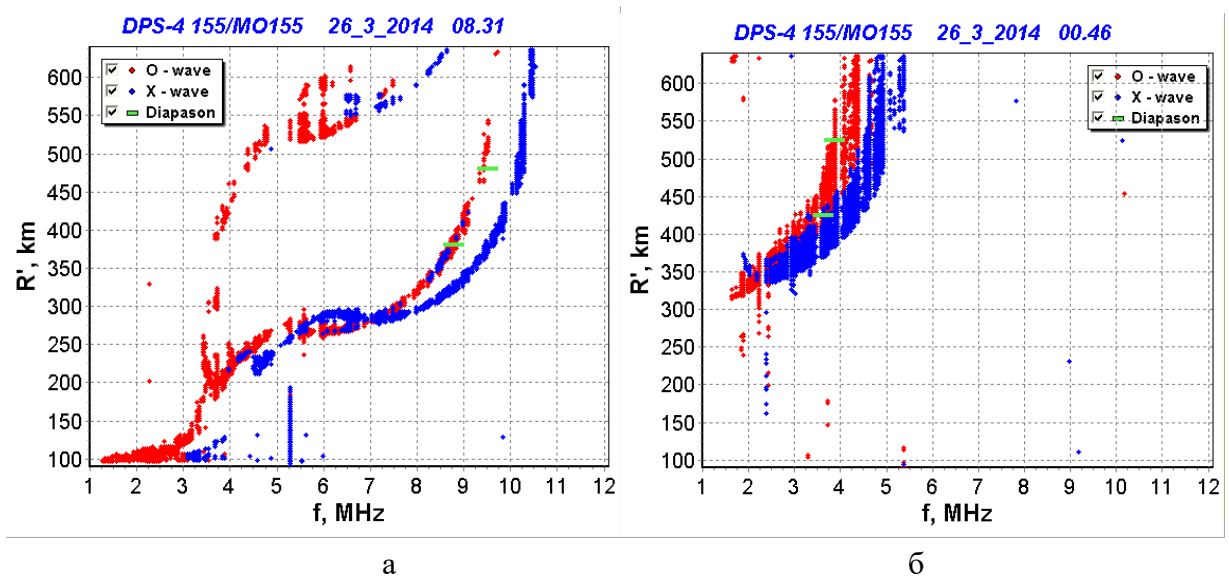


Рисунок 2.12 - Обработка ионограмм DPS-4 в RSF-формате для случаев рисунка 2.11.

Рисунок 2.13 показывает суточный ход вероятности появления F-рассеяния для различных лет 2012-2014, полученный с использованием автоматизированного алгоритма с усреднением для каждого часа по данным за весь год.

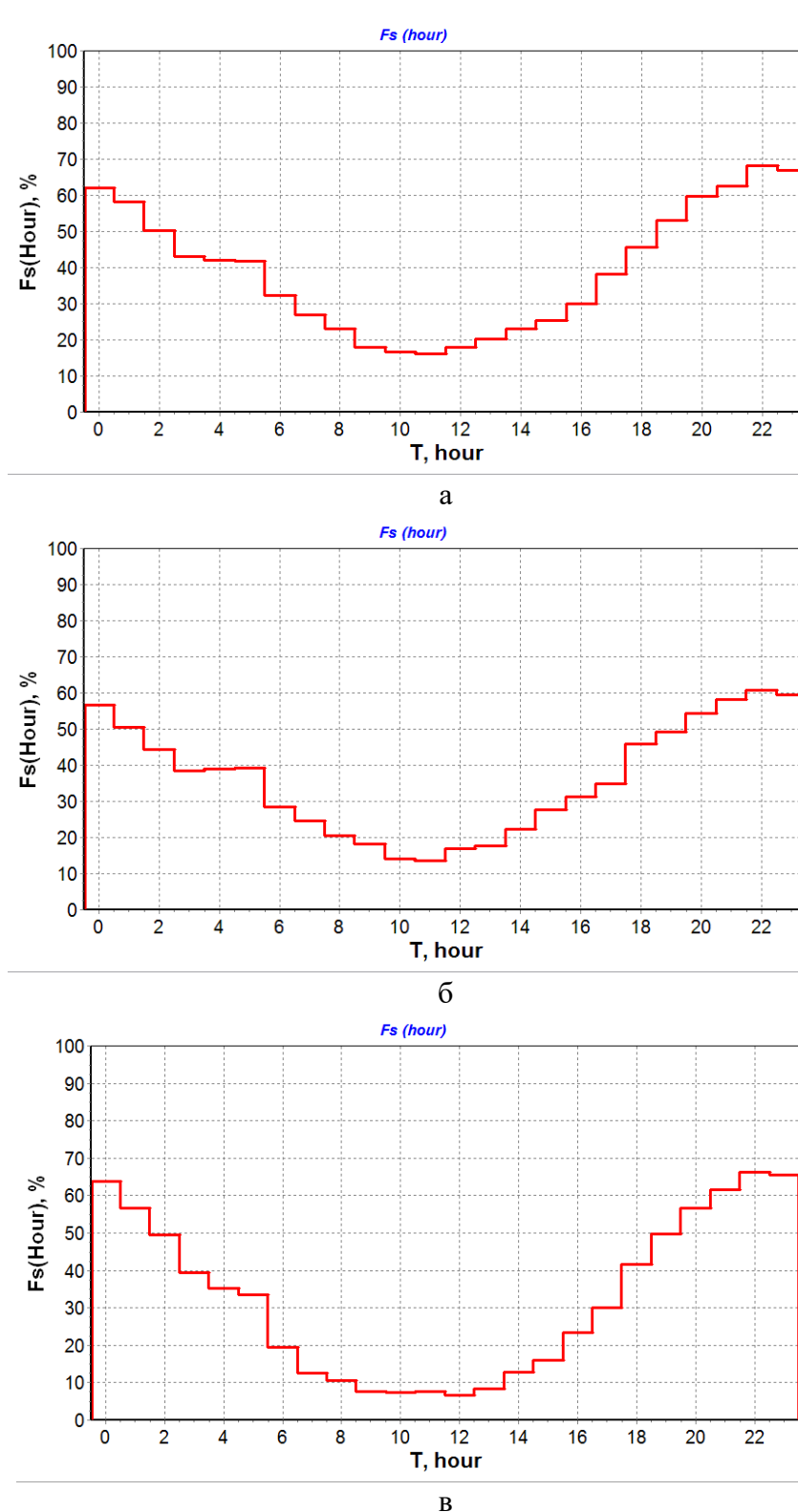


Рисунок 2.13 - Суточный ход вероятности F-рассеяния для различных лет: а – 2012 г., б – 2013 г., в – 2014 г.

Первое сравнение результатов F-рассеяния автоматизированной и ручной обработки проводилось для летних и зимних ионограмм 2013 г., например, в марте обработали 2972 15-мин измерения из 2976.

На рисунке 2.14 показана вероятность отбраковки ионограмм.

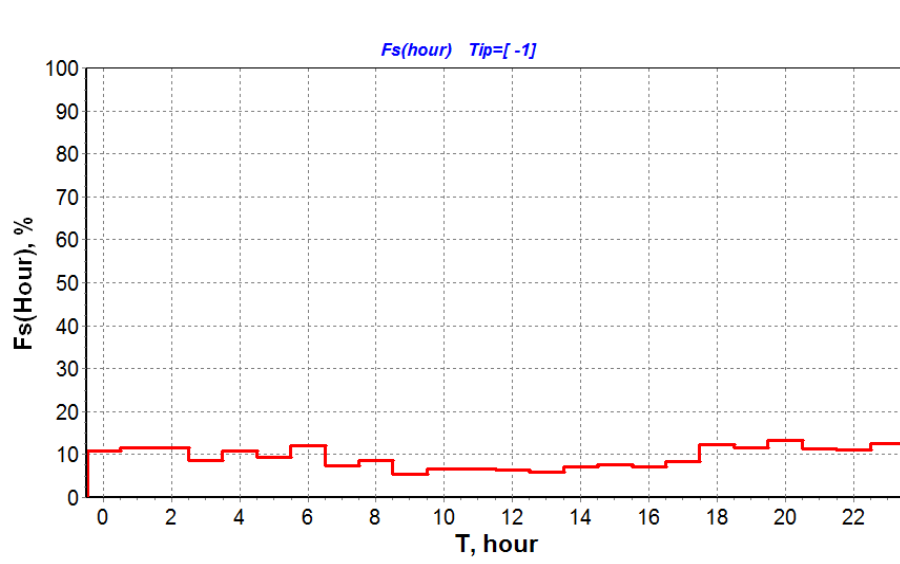


Рисунок 2.14 - Суточный ход вероятности отбраковки ионограмм в 2014

Потом сравнение ручной и автоматизированной обработки было проведено для достаточно длительного временного промежутка (1 год). И эти результаты показали 11-20% неопределенность алгоритма автоматической обработки для характеристик F-рассеяния в зависимости от сложности F-рассеяния, определяемой балльной классификацией (от 0 до 3): чем меньше балл, тем лучше соответствие. Так, очень хорошее совпадение ручного и автоматического результатов получено при «1», при умеренном F-рассеянии («2») различия составляют 1-2%. Для «3» наблюдали сильное рассеяние с неопределенностью 3,3%, но она не превышала 7%.

Как показал анализ различий числа успешного ручного и автоматического определения индексов F-рассеяния, существует ряд факторов, влияющих на это определение. Один из них является неустранимым из-за невозможности определения foF2 автоматически. Второй фактор – срыв работы программы ARTIST-5, продемонстрированный в [126].

Полученные результаты показали высокую работоспособность и статистическое совпадение с ручной обработкой с точностью, сопоставимой с ARTIST-5. Для более детального анализа необходима проверка работы в составе отдельных видов средств радиосвязи, навигации и локации. По крайней мере, можно утверждать, что предложенный алгоритм обеспечивает более полную информацию о свойствах ионосферы, например, F-рассеяния.

Более подробно результаты, представленные в этом разделе, рассмотрены в [122-128].

2.2.4. Особенности программного комплекса «Viewer_DPS4» в исследовательском режиме

Исследовательский режим комплекса «Viewer_DPS4» представлен разработанным модулем «LocalDrift». Его функцией является определение скорости дрейфа ионосферной плазмы при исследовании дифракционной картины и движения ее проекции на землю.

Доплеровская селекция вместе с измерением углов прихода радиоволн позволяет определить три проекции скорости для каждой неоднородности, для которой имеются дальность, угол и доплеровский сдвиг частоты (подобно классической радиолокации). Компоненты скорости дрейфа (V_x , V_y , V_z) определяют лучевую скорость v движения неоднородности, от которой отразился сигнал:

$$v = f_d \lambda / 2 = V_x \cdot \sin \theta \cdot \cos \psi + V_y \cdot \sin \theta \cdot \sin \psi + V_z \cdot \cos \theta, \quad (2.1)$$

где θ и ψ – полярный и азимутальный углы прихода отраженного сигнала.

Наличие сигналов, отраженных от 3-х точек, позволяет вычислять компоненты (V_x , V_y , V_z) с использованием линейной системы из 3-х уравнений. Наличие сигналов, отраженных более, чем от 3-х неоднородностей, приводит к переопределенной системе линейных уравнений, которая должна решаться, например, методом наименьших квадратов.

В программе «LocalDrift» для дополнительной проверки предусмотрены два варианта расчета:

- 1) общей скорости по всем используемым точкам,
- 2) отдельно скорости для всевозможных наборов трех точек с последующим усреднением.

Расчет считается правильным, если совпадают результаты обоих вариантов. Дополнительно сравнивается значение СКО со значением скорости V . Свидетельством правильности является соотношение $\text{СКО} < V$.

Результаты работы модуля приведены на рисунке 2.15. Точки показывают рассчитанные углы прихода отраженных сигналов. Величины доплеровского сдвига частоты отображаются градациями цвета в диапазоне от -3.125 Гц (выделено темно-красным цветом) до +3.125 Гц (темно-зеленый). Общее направление дрейфа ионосферной плазмы указывается стрелкой из центра окружности, другие стрелки показывают направление движения отдельных областей из центра выбранной области. Особенностью является возможность интерактивного взаимодействия с пользователем, для чего на экран выводятся соответствующие параметры и численные значения полученных результатов:

- 1) общее число зарегистрированных эхо,

- 2) усредненный угол отражений,
- 3) азимут направления дрейфа,
- 4) значения компонент скорости (V_x , V_y , V_z).

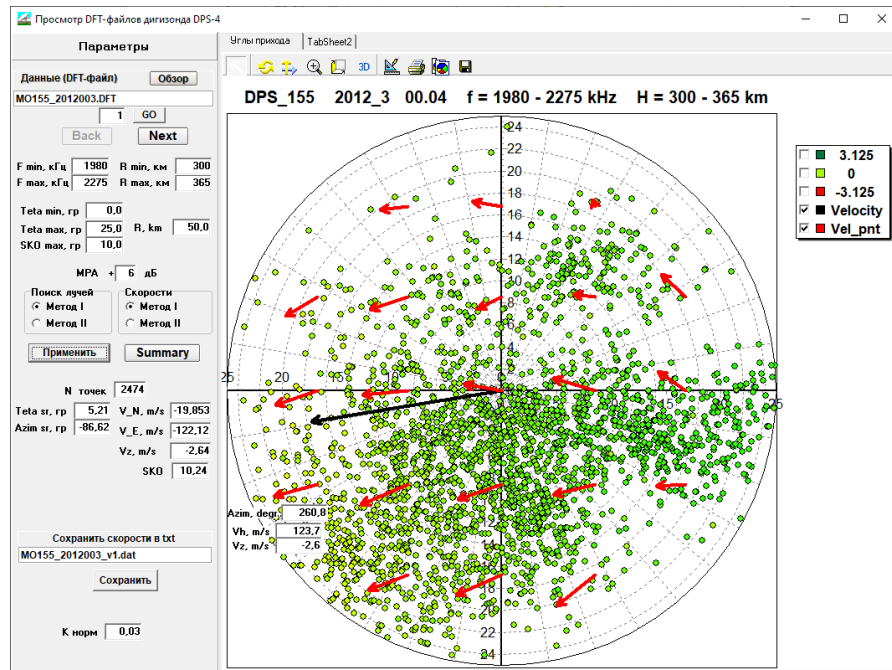


Рисунок 2.15 - Модуль «LocalDrift»

Модуль позволяет:

- определять общее число отраженных сигналов во всем частотном интервале,
- выделять из данных одну или несколько областей, ограниченных по заданному параметру: частота, действующая высота или положение на карте;
- расчет полярного и азимутального углов прихода каждого луча с использованием фаз на приемных антеннах и их погрешности;
- контролировать энергетические характеристики отраженных сигналов;
- выделять только лучи, приходящие из заданной области;
- рассчитывать общую скорость и направление дрейфа плазмы для выбранной области по значениям доплеровского смещения, а также ее погрешности;
- отображать на экране промежуточные и конечные результаты работы;
- сохранять в файле необходимые данные.

Из рисунка 2.15 видно, что в случае достаточно однородной структуры ионосферы в районе ионозонда вектор скорости дрейфа может иметь направление, очень близкое к общему направлению скорости дрейфа в отдельных зонах. Однако могут быть и другие примеры, показанные на рисунке 2.16.

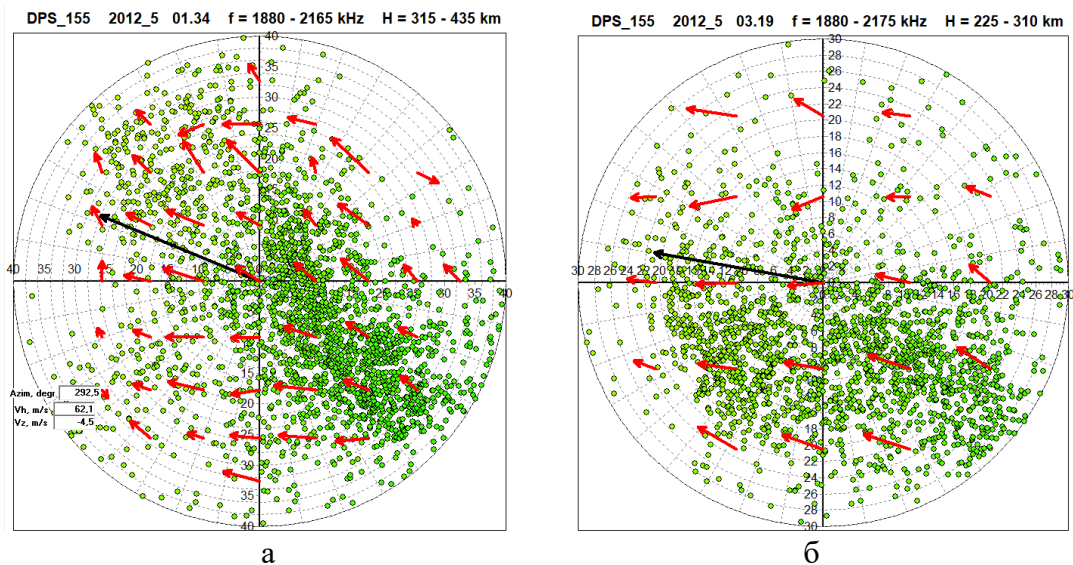


Рисунок 2.16 - Обработка ионограмм с разделением по областям

В частности, когда структура ионосферы неоднородна, отражения могут разделяться на несколько крупных независимых групп по пространству и величине доплеровского смещения частоты. В этом случае расчет общей скорости дрейфа теряет смысл, гораздо больший интерес представляет определение параметров дрейфа каждой группы в отдельности. Стандартная процедуры обработки, используемая в DPS-4, этого делать не может, однако модуль «LocalDrift» предусматривает такую возможность. Пример такой ситуации иллюстрируется на рисунке 2.17. Стрелки также определяют направление, а их длина – значение скоростей каждой группы отражений. Приводятся также и результаты стандартного расчета – стрелка из центра рисунка. Видно, что дрейф отдельных групп происходит независимо друг от друга.

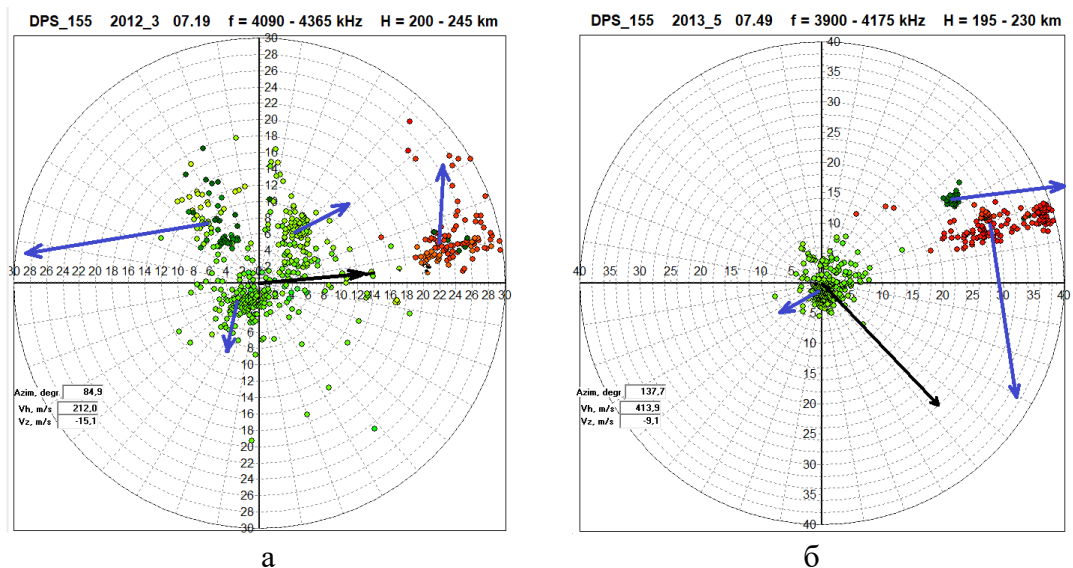


Рисунок 2.17 - Независимая обработка нескольких крупных групп отражений

Рисунок 2.18 показывает, что разделением по частотам можно выявить две группы независимых отражений.

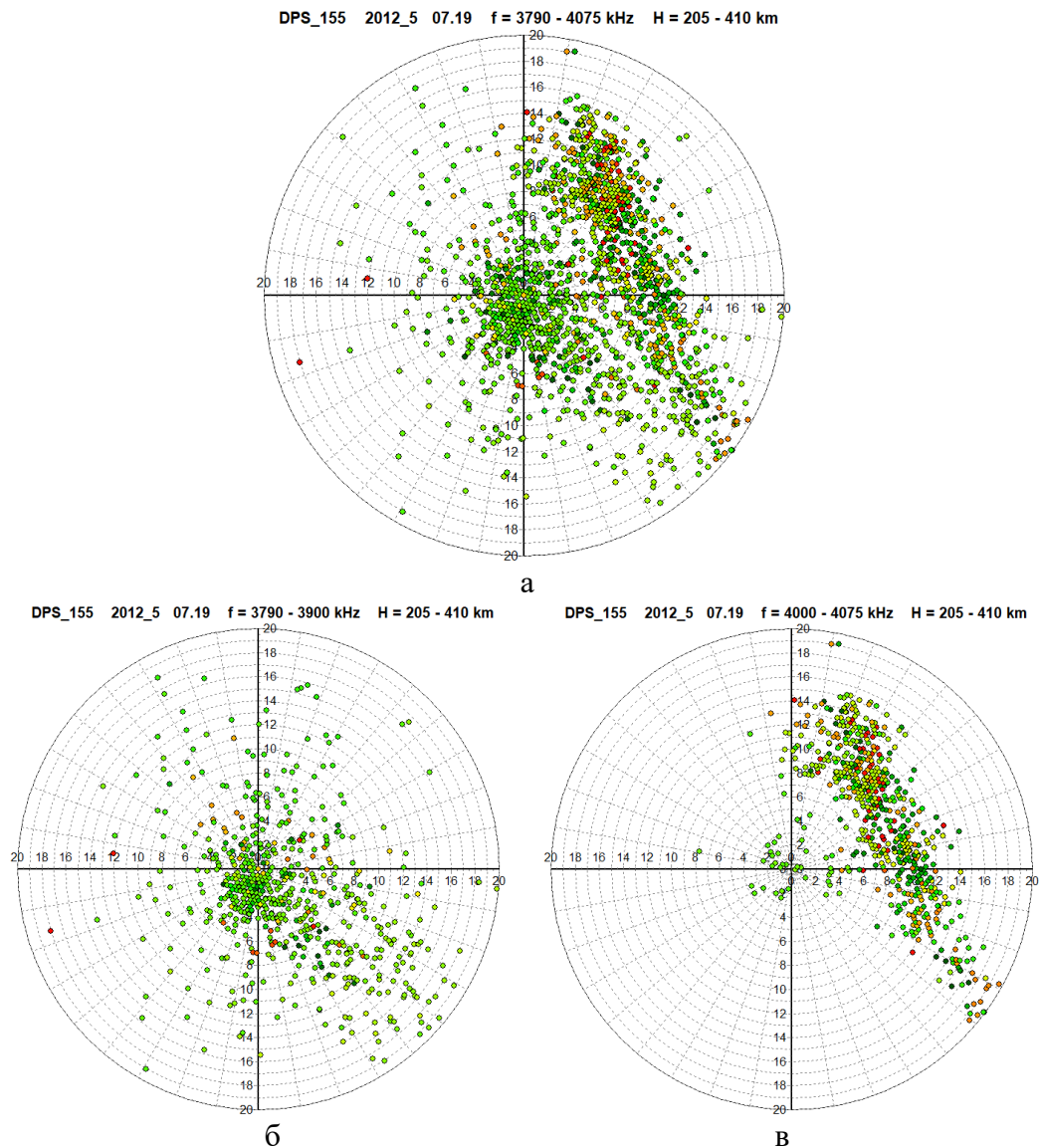


Рисунок 2.18 - Разделение отраженных сигналов по частотам: во всем частотном интервал 3790-4075 кГц (а), в диапазоне 3790-3900 кГц (б), в диапазоне 4000-4075 кГц (в)

Условия возникновения множественных отражений

Анализ ионограмм основного режима и «SkyMap» позволил найти условия возникновения множественных отражений. Результаты обработки многолетних записей показали: 1) сильный эффект F-рассеяния, 2) связь множественных отражений с рассеянием силой двух баллов (2, 3). Равномерное распределение отражений характеризовалось незначительным доплеровским смещением, что подтверждается рисунком 2.16 с ионограммой на рисунке 2.19.

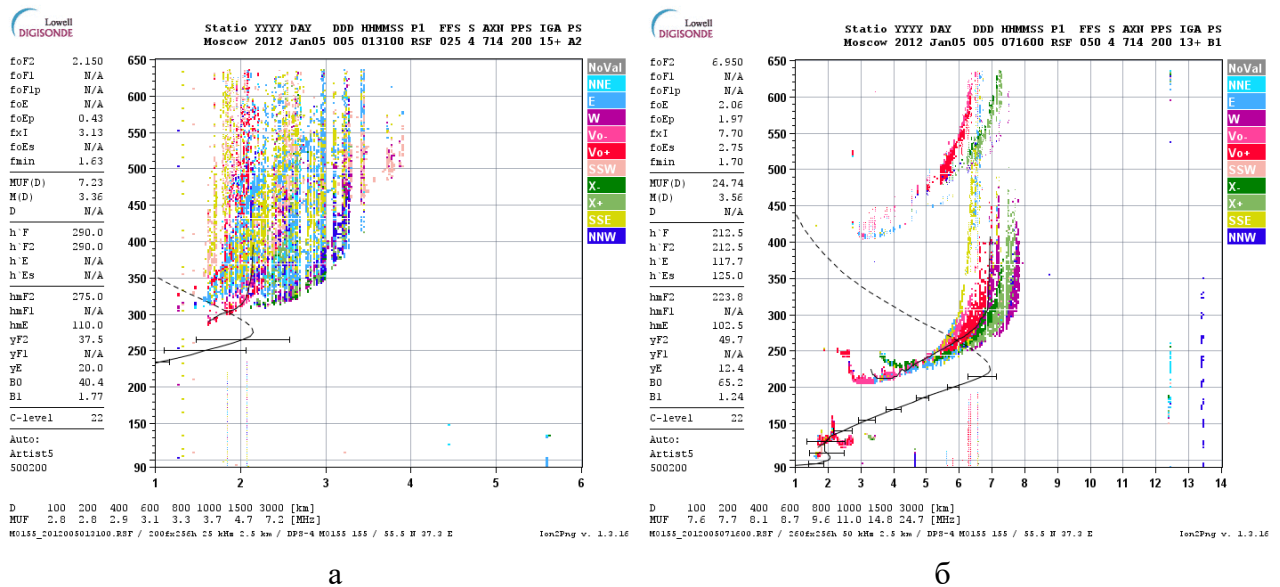


Рисунок 2.19 - Ионограммы, соответствующие множественным отражениям: а) рисунка 2.16а; б) рисунка 2.18а

Ионограмма рисунка 2.19б, соответствующая рисунку 2.18а, показывает множественные отражения, связанные с F-рассеянием силой 1 и 2 балла. Ионограмма рисунка 2.20 соответствует отсутствию F-рассеяния.

На рисунке 2.20, соответствующем картине отражений рисунка 2.17, нет признаков F-рассеяния.

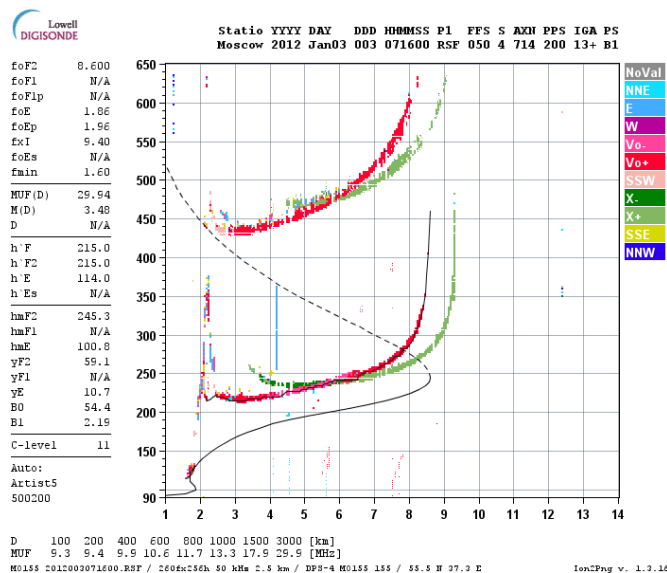


Рисунок 2.20 - Ионограмма, соответствующая картине отражений рисунка 2.17а

Эти результаты позволяют сделать однозначный вывод, что независимые компактные группы отражений с большими доплеровскими сдвигами могут быть связаны с достаточно крупными неоднородностями.

Кроме того, модуль «LocalDrift» расширяет возможности обработки ионограмм. В работах [129-135] автором совместно с коллективом сотрудников ЮФУ, ИЗМИРАН и ПГИ на примере исследования дрейфа в F-области в районе п.Москва проведено сопоставление результатов обработки данных радиопросвечивания сигналами ИСЗ с данными ионозонда DPS-4 в «исследовательском» режиме. Результаты работ показывают возможность использования данных ионозонда для исследования направления дрейфа в F-области среднеширотной ионосферы.

Выводы

Описание программного комплекса «Viewer_DPS4», представленное в данном разделе, показывает, что комплекс является инструментом обработки и анализа данных ионозонда DPS-4 в автоматизированном режиме для расчета F-рассеяния.

Модули «Viewer_DPS4» существенно расширяют возможности ионозонда DPS-4. Их можно рекомендовать для модификации ионозондов, используемых для мониторинга состояния ионосферы,

2.3. Современные принципы ионосферного радиозондирования, реализованные в ДИНАЗОНДЕ-21

Диназонд – это название идеологии ионосферного радиозондирования, развитие которой началось в Institute for Telecommunication Sciences and Aeronomy (ныне NOAA) в Боулдере, Колорадо. Само имя обозначает «систему, способную зондировать весь диапазон динамических вариаций ионосферы» [136].

Отличительными особенностями идеологии Диназонда являются [13,137]:

А) *Крайне низкие помехи для других пользователей радио спектра.* Диназонд избегает применения длинных последовательностей импульсных сигналов, излучаемых на одной и той же базовой частоте. Вместо этого используются короткие последовательности (от 3 до 8) узкополосных (30 кГц) импульсов, в которых частоты немного смещены (на 1-4 кГц) по отношению к базовой частоте. Специально подобранная схема обеспечивает точные (с разрешением до нескольких десятков метров) измерения дальности методом стационарной фазы [138].

Б) *Бережное отношение к физическим свойствам сырых данных в процессе их обработки.* На этапе распознавания радиоэхо громоздкие математические процедуры, такие как Фурье преобразование, импульсное кодирование или когерентное суммирование, не используются. Вместо этого непосредственно используются фаза и амплитуда принимаемых

сигналов, определенные по сырым значениям квадратурных компонент I и Q . Как следствие, процедуры Диназонда, предназначенные для обработки данных низкого уровня, дают превосходную статистику опознанных радиоэхо, снабженных точными значениями физических параметров, каждое из которых сопровождается индивидуальной оценкой погрешности [139]. Тот же процесс распознавания и характеристики эхо позволяет эффективно очистить данные от ложных эхо и шума. Т.о., радиоэхо заменяет в идеологии Диназонда понятие «ячейки в пространстве дальность-частота», привычные для более ранних методов зондирования.

В) *Более тонкие и разнообразные методы высокого уровня обработки данных.* К этим методам можно отнести процедуру автоматической классификации эхо и их отбора в «следы» с использованием эффективных критериев, которая позволила оптимизировать входные данные. Реализованы такие возможности, как автоматическое определение основных параметров ионосферы, спектра мелкомасштабных неоднородностей [140], трехмерная инверсия Ne (метод NeXtYZ [12,13]), расчет векторных скоростей движения слоев [141]. И все это относится к обработке ионограмм.

Техническое применение идеологии и методов Диназонда обусловлено появлением нового ВЧ радара, разработанного в NOAA [142]. Он отличается высоким выходным разрешением данных, их широким динамическим диапазоном; минимизацией помех; качеством приемных трактов; цифровым определением данных. Его улучшенный вариант добавляет к уже существующим преимуществам новые полезные возможности [143].

Диназонд-21 является набором программ, включающим все существующие методы анализа данных. Многолетнее тестирование показало, что эти методы обеспечивают не только точность, но и устойчивость, такие важные для оперативного мониторинга. Данные новых диназондов с ноября 2007 года обрабатываются этим программным обеспечением. Графический вариант ионограммы приведен на рисунке 2.18. Измеренная групповая дальность R' и вычисленный методом NeXtYZ вертикальный профиль Z как функция радио (и плазменной) частоты (в МГц), соответственно, показываются с использованием логарифмических шкал. Цвета и номера следов идентифицируют классы радиоэхо: помеченные знаком '*' отображены для процедур инверсии; помеченные знаком '<' не используются для инверсии. На врезке показаны восточно-западная (красная линия) и северо-южная (синяя линия) компоненты наклона поверхностей электронной концентрации в «Клиновидно-Стратифицированной Модели» (КСМ) как функции Z , вычисленные NeXtYZ. Еще одно нововведение подхода NeXtYZ – погрешности вертикального профиля электронной концентрации, отражающие качество аппроксимации КСМ измеренных параметров эхо обыкновенной и необыкновенной поляризации. Амплитудная панель

(обозначенная знаком 'dB') показывает уровень сигнала и шума (черная линия). Данная ионограмма соответствует примерно полудню местного времени. Радар работает с пониженной мощностью. Умеренное поглощение на высоких частотах позволяет видеть главным образом местные вещательные станции в шумовых данных. Отбор следов проведен без ошибок. Погрешности на профиле электронной концентрации демонстрируют реакцию на присутствие среднемасштабной структуры в районе и выше 3 МГц.

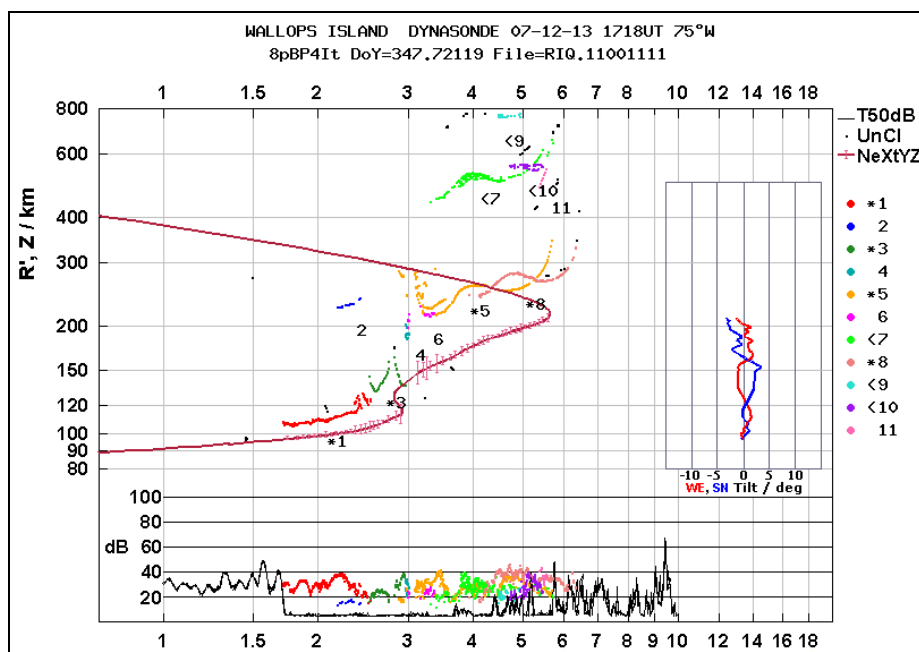


Рисунок 2.18 - Верхняя панель стандартного изображения ионограммы Диназонда 21

Более подробное описание особенностей программно-аппаратного комплекса Диназонд-21 приведено в приложении 1.

2.3.1. Принцип восстановления трехмерного распределения электронной концентрации ионосферы по ионограммам dynasonde-21

Задача восстановления высотного профиля электронной концентрации (инверсии) по данным цифровых ионограмм вертикального зондирования рассмотрена в данном разделе с учетом новых возможностей и современных требований. Необходимо отметить, что система обработки данных dynasonde-21 обеспечивает кроме точных измерений действующей высоты отраженного сигнала еще направления прихода, которые обеспечивают трехмерное определение сигналов. В данном разделе описывается лучевой подход, который позволяет определить параметры сложной трехмерной модели локального электронного распределения плотности (клиновидно-стратифицированная ионосфера) и рассчитать вертикальный $N(h)$ профиль вместе с горизонтальными градиентами и базовым наклоном, что требует большой мощности современных РС для быстрого проведения таких расчетов. Для отличия этого

метода, включающего описанный подход и соответствующий алгоритм, ему дали название "NeXtYZ", указывающее на трехмерность получаемого профиля.

Как уже отмечалось в начале раздела, задача восстановления реального высотного профиля требует набора существенных физических идеализаций. Главное из которых, используемое до сих пор методами восстановления профиля, – предположение о плоской горизонтально-стратифицированной ионосфере, позволяющее свести рассматриваемую проблему только к одному измерению. Таким образом, все поверхности равной электронной плотности являются горизонтальными плоскостями и рассчитывается только вертикальный градиент. Волновой вектор сигнала, отражающегося в этой среде, всегда вертикален. Сигналы разных частот (и разных видов поляризации) распространяются вверх до (и вниз от) их высоты отражения в одинаковых плазменных условиях. Одним из важных параметров является геомагнитное поле, направление которого определяется местным углом магнитного склонения.

Свойства реальной ионосферы значительно отличаются от идеальной картины, в частности, за счет наклонных крупномасштабных горизонтальных градиентов электронной концентрации, которые возникают под воздействием огромного числа процессов. К ним относятся эффекты солнечного терминатора, перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), акустические гравволны, экваториальная аномалия, высыпающиеся частицы, плазменные пузыри и общая широтно-долготная изменчивость ионосферы. Среднемасштабные (~10–100 км) и мелкомасштабные (~0.1–2 км) неоднородности добавляют дополнительную сложность поведению ионосферы, приводя к многолучевым отражениям и "размыванию" эха по большому диапазону действующих высот. Влияние комбинации этих эффектов приводит к распространению отраженных сигналов по траекториям, отличающимся от вертикальных. Это приводит к несоответствию между фактическими данными и предположениями [144].

В рамках таких предположений и были разработаны более 20 лет назад методы, широко используемые в настоящее время, POLAN и NhPC (часть системы обработки данных Digisonde ARTIST) и с тех пор данной проблеме почти не уделялось внимания. Новые возможности, связанные с развитием современной вычислительной техники, позволят удовлетворить высокие требования к качеству информации об ионосферном профиле [105–107]. Можно констатировать, что это является важными причинами для того, чтобы пересмотреть проблему инверсии электронной плотности по ионограммам.

На рисунке 2.19 представлены явные трехмерные построения, иллюстрирующие преимущества dynasonde-21, а именно, точное измерение времени группового запаздывания и направления прихода каждого отраженного луча на ионограмме.

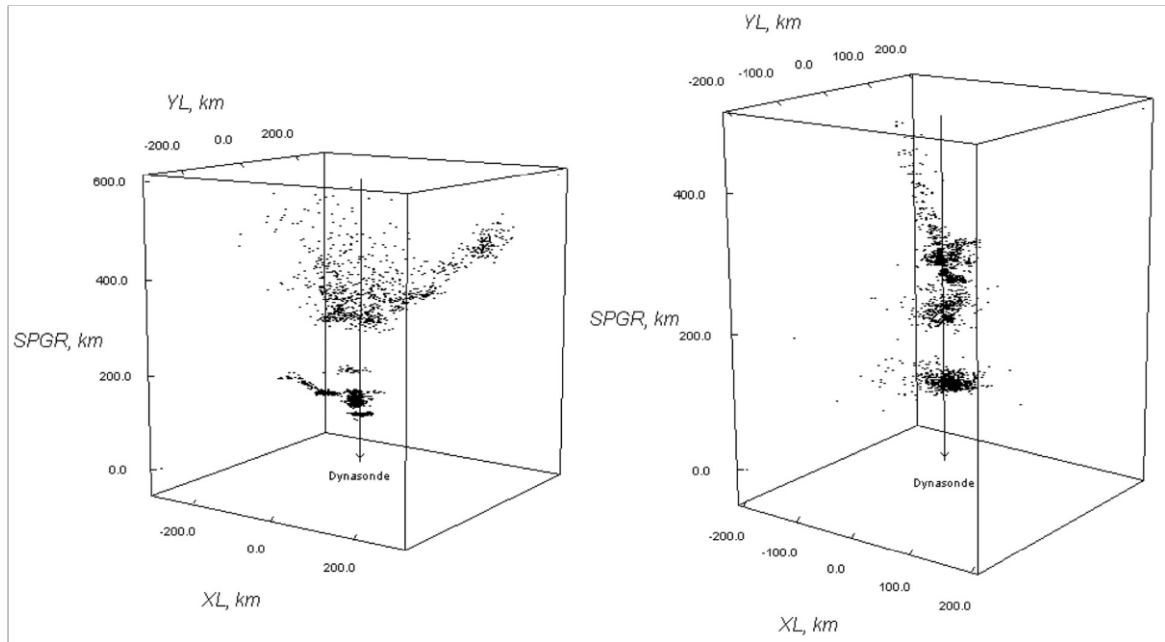


Рисунок 2.19 - 3-D результаты зондирования, обработанные процедурой dynasonde-21 в Tromsø (слева) и в обсерватории Bear Lake, штат Юта (справа)

Каждая точка на этих графиках определяет конец "вектора группового пути" [137] для направления прихода луча, измеренного диназондом. Вектор эквивалентен длине половины времени группового распространения, определенного с большой точностью методом стационарной фазы. Реальные положения точек отражения будут отличаться от приведенных из-за рефракции в неоднородной магнитоактивной ионосферной плазме. Для решения "прямой задачи" эти эффекты можно рассчитать по лучевой траектории, однако нужно знать трехмерное распределение ионосферной плазмы. Таким образом, в процессе восстановления профиля лучевая траектория становится компонентом в процедуре как звено, связывающее пространственное распределение N_e с измеренными значениями характеристик отраженных лучей и их угловыми координатами. Это определяет основную стратегию новой схемы инверсии NeXtYZ.

Необходимо отметить, что задачей трехмерной (3-D) инверсии по данным ионограмм не является обеспечение широкой пространственной зоны, подобно методу радиотомографии. Это позволяет сформулировать задачу трехмерной инверсии как восстановление параметров параметрической модели, способной описать вертикальные и горизонтальные градиенты плотности ионосферной плазмы в локальном масштабе. При этом прежняя модель "плоско-стратифицированной ионосферы" заменяется моделью "клиновидно-стратифицированной ионосферы" (КСИ).

В этой модели КСИ поверхности постоянной плотности электронной концентрации задаются с небольшими приращениями по плазменной частоте f_{pi} в диапазоне высот h_i по

вертикальной оси. Для характеристики наклона каждой структурной плоскости вводятся две горизонтальные компоненты вектора нормали к ней n_{xi} , n_{yi} . Сама нормаль к поверхности электронной плотности определяет локальное направление общего градиента в слое.

Также делается предположение о "клиновидном" распределении электронной плотности между двумя соседними структурными плоскостями с основным требованием постоянства плазменной частоты на каждой такой плоскости. Дополнительным требованием является отсутствие пересечений поверхностей структуры в пределах "поля зрения" ионозонда, однако пересечения допустимы вне области ее применимости, поскольку КСИ – локальная модель.

Есть несколько простых функций, удовлетворяющих этим требованиям и достаточно хорошо подходящих для целей инверсии. К ним относится зависимость электронной плотности только от угла между смежными структурными плоскостями, например, $\xi = l/(l+d)$, изменяющейся от 0 до 1 между двумя плоскостями с расстоянием l до более низкой плоскости и d – до верхней. Зависимость $N_e(\xi)$ должна обеспечивать приблизительную непрерывность градиента плотности в границах клина в пределах поля зрения ионозонда.

Расчет траекторий будет выполняться численными методами, т.к. распространение зондирующих сигналов в модели КСИ является существенно трехмерным и аналитические приближения не могут дать даже качественной картины.

Основной особенностью модели КСИ является описание изменения трехмерного наклона локальных ионосферных слоев с высотой. При этом опция построения одномерного (то есть, вертикального) профиля не потеряна. Если иметь трехмерное распределение электронной концентрации, то можно восстановить любую ее одномерную часть без каких-либо дополнительных трудностей.

Действующие в настоящее время версии NeXtYZ воспроизводят параметры индивидуального набора плоскостей КСИ для каждой ионограммы. Такой подход, применимый для многих целей, дает возможность для развития, например, более тщательного описания сложных ионосферных ситуаций.

Для дальнейшего исследования необходимо сделать предварительные замечания о влиянии ионосферных неоднородностей на параметры зондирующих сигналов, а также некоторые требования, предъявляемые этим влиянием к искомому алгоритму инверсии электронной плотности.

1. Алгоритм должен легко обрабатывать данные, содержащие существенный случайный компонент или неопределенность, вызванную пространственной изменчивостью в электронной плотности в нижележащей ионосфере.

2. Алгоритм должен использовать всю доступную экспериментальную информацию о

пространственных свойствах распределения электронной плотности. В настоящее время эта информация включает групповые пути и углы прихода радиосигналов с учетом магнитоионной поляризации.

3. Подход, основанный на подгонке заданной комбинации функций ко всему ионосферному профилю, неприемлем.

Чтобы удовлетворить этим требованиям в NeXtYZ, необходимо реализовать следующие принципы и шаги.

1. Замена большинства упрощающих предположений численным расчетом лучевых траекторий для всех отобранных лучей на ионограмме и учет наблюдаемых углов их прихода.

2. Необходимость начинать инверсию с определенного уровня с последующим набором тонких слоев плазменной частоты ("клиньев"). Основная задача при этом – выбор шага для плазменной частоты, хотя она управляется локальной плотностью отражений для конкретной ионограммы, помогая задать ее текущий интервал. Ниже описывается проблема оптимизации, для решения которой нужно достаточное число лучей, отраженных в пределах каждого клина. Благодаря удобству предварительной обработки диназондом данных, сигналы были сведены в "следы" и следы были объединены согласно их поляризации [145]; следы обеих поляризаций, когда они присутствуют, вносят одинаковый вклад в NeXtYZ.

3. Минимизация разницы между расчетными и наблюдаемыми временами распространения и направлениями индивидуального отражения методом наименьших квадратов при выполнении инверсии.

4. Преодоление "начальной проблемы", для чего первый шаг решается одновременно для параметров самого низкого плазменного слоя (клина) и для трех поправочных коэффициентов модели Титтериджа [117,146-148], которая сшивается с начальным интервалом инверсии.

5. Использование одной и той же повторяющейся процедуры для всех плазменных клиньев, относящихся к наблюдаемой монотонной части ионосферного слоя. Параметры всех нижележащих клиньев не меняются. Определение вертикального положения h_{i+1} следующей структурной плоскости (соответствующей плазменной частоте f_{pi+1}) и ее ориентация (n_{xi+1} , n_{yi+1}) в результате специальной процедуры минимизации для разности между измеренными и расчетными параметрами того набора лучей, которые отражаются между f_{pi} и f_{pi+1} . Рисунок 2.20 иллюстрирует геометрическую схему метода оптимизации. Каждая итерация процедуры включает нахождение групповых времен распространения для всех лучей, отраженных в пределах текущего клина. Рисунок 2.20 показывает результаты

численных расчетов лучевых траекторий с учетом измеренных углов прихода в двумерной проекции. Лучи обыкновенной поляризации показаны сплошными линиями, для необыкновенной поляризации – пунктирными линиями. Соответствующие точки отражения представлены серыми кружками. Для наглядности показаны два предыдущих клина и рассчитываемый клин ($i+1$) со своей верхней границей.

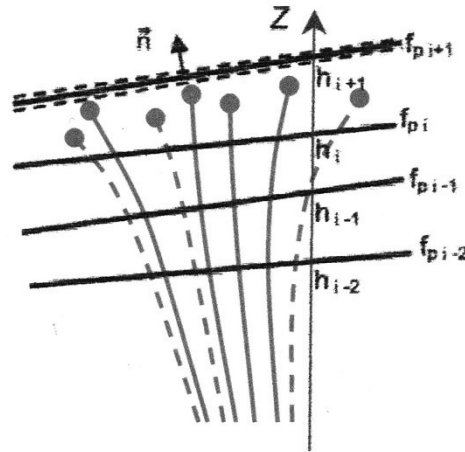


Рисунок 2.20 - Геометрическое представление метода оптимизации

6. Определение общей формы долины из модели [117], если наблюдения содержат признаки присутствия E-F долины. Отражения обеих поляризаций рассматриваются равноправно, поскольку независимость этих поляризаций несет полезную информацию о строении профиля.

7. Для решения проблемы минимизации в области пиков E- и F-слоев осуществляется подбор параметров модели слоя Чепмена для каждого слоя и оцениваются параметры для модели верхней ионосферы [149,150].

8. Преодоление магнитоионного явления "бокового отклонения" [151], в результате которого лучи обыкновенной и необыкновенной поляризаций отражаются от различных областей, разнесенных по долготе. Кстати, этот долготный разнос точек отражения при наличии градиентов был главной причиной несогласованностей и предыдущих неудач объединения двух поляризаций для восстановления профиля по ионограммам вертикального зондирования. В NeXtYZ эта проблема решена.

9. Сохранение расчетных положений точек отражения и времен распространения (групповых путей) для каждого луча при выходе из процедуры. Когда параметры модели КСИ полностью рассчитаны, вычисляются лучевые траектории для побочных отражений, которые не принимали участия в процедуре инверсии (например, следы бокового отражения, спорадические слои). Это дает возможность NeXtYZ учесть все существенные ионосферные структуры в реальном трехмерном пространстве, которые привели к отражениям.

В NeXtYZ используется алгоритм численного расчета лучевых траекторий, основанный на методе характеристик [21] и подробно описанный в главе 1.

Существует несколько упрощений для траекторных вычислений, которые могут привести к существенному ускорению процедуры инверсии. Для их реализации расчет проводится в последовательном наборе клиньев, ранее рассчитанных, начиная с нижнего. Используя процедуры минимизации по методу наименьших квадратов для определения параметров текущего клина, можно рассчитать и зафиксировать параметры траектории во всех предыдущих клиньях, так что необходимо повторно вычислять только ту часть траектории луча, отраженного в пределах текущего клина, которая лежит в нем. Кроме того, лучи, обнаруженные диназондом, представляют радиосигналы, которые были отражены ионосферой назад к местоположению зонда. При этом разнесение передающей и приемной антенн является незначительным, так что разумно предположить, что нисходящая ветвь траектории совпадает с ее восходящей ветвью. Это сокращает расчет полной траектории до ее половины – только часть от передатчика до точки отражения. Измеренные углы прихода луча служат начальными условиями для этих расчетов.

В этом случае клиновидно-стратифицированная модель ионосферы требует только стандартного и относительно простого распределения электронной плотности в пределах единичных клиньев. Для этого предположим, что параметры всех основных клиньев были уже найдены. Это означает, что существуют три параметра, полностью управляющие этим распределением для текущего клина: 1) вертикальное положение h_{i+1} его верхней границы (следующей структурной плоскости, соответствующей плазменной частоте f_{pi+1}), 2) ориентация этой плоскости, характеризуемая горизонтальными компонентами вектора ее нормали n_{xi+1} и n_{yi+1} . В соответствии с процедурами анализа данных диназонда обычно находится множество лучей, отраженных в пределах каждого клина. Для целей инверсии требуются, по крайней мере, 10 таких лучей. Если необходимо иметь больше отражений, стандартный шаг по плазменной частоте для некоторых клиньев увеличивается (исходный шаг NeXtYZ равен 0.05 МГц). В случаях, когда число отражений превышает 50 для минимального шага по плазменной частоте, оно не увеличивается и используются только 50 отражений самой высокой амплитуды во избежание ненужных вычислительных затрат.

Каждый отраженный сигнал характеризуется набором физических параметров, к которым относятся:

- 1) амплитуда,
- 2) поляризация,
- 3) два угла прихода θ_j и φ_j ,

- 4) групповой путь R_{0j} , измеренный методом стационарной фазы,
- 5) усредненная фаза R^*_{j} ,
- 6) оценки соответствующих ошибок.

В NeXtYZ используются все параметры за исключением фазы. Их роль заключается в следующем. Значение амплитуды в децибелах является весовым коэффициентом при некоторых усредняющих операциях и процедурах выборки. Поляризация ("О" или "Х") определяет соответствующее выражение для показателя преломления падающей волны в магнитоактивной плазме. Углы прихода обеспечивают начальные условия на поверхности для системы уравнений луча и определяют две другие полезные характеристики: средние углы прихода (Θ_{i+1} и Φ_{i+1}) для лучей, отраженных в пределах клина. Значения группового пути используются без каких-либо изменений в процедуре оптимизации.

В пределах клина точки отражения лучей могут распределяться произвольно. Для достаточно гладкого распределения электронной плотности точки отражения имеют тенденцию располагаться вдоль линии, не обязательно прямой, для которой независимой переменной могут быть частота, время или их комбинация. Для типичной ситуации присутствия мелкомасштабных структур точки отражения рассеяны в пространстве (рисунок 2.19). Если траектория луча рассчитана достаточно точно, то NeXtYZ не накладывает каких-либо ограничений на пространственное распределение точек отражения. Если рассчитанное положение точки отражения оказывается ниже текущего клина, луч исключается из процесса оптимизации.

Поскольку групповой путь R_{0j} и углы прихода θ_j , ϕ_j луча, отраженного в пределах текущего клина, чувствительны к параметрам этого клина (h_{i+1} , n_{xi+1} и n_{yi+1}), цель и главная идея процедуры оптимизации состоят в определении наилучших значений h_{i+1} , n_{xi+1} и n_{yi+1} . Они определяются минимизацией (последовательно, а не совместно) двух величин: 1) отклонения $\Delta R'_{i+1} = \sqrt{\sum_j (\rho'_{i+1,j} - R'_{i+1,j})^2}$ для рассчитанного (ρ'_j) и измеренного (R'_j) значений групповых времен и 2) расстояния между положением зонда (точкой отсчета системы координат) и "точкой возврата" для луча, излученного из этой точки под углами Θ_{i+1} и Φ_{i+1} , определенными выше.

Существование ненаблюдаемой ионизации представляет большую проблему зондирования ионосферы. Она обусловлена отсутствием измерений ниже минимальной плазменной частоты, обнаруженной ионосферным зондом (по отражению лучей О- и Х-компонент) и в области долины Е-F. Информация о "невидимой" не необходима для

восстановления профиля видимой, поэтому необходимо обращаться к соответствующим моделям. Для сумеречно-ночной E-области и области E вместе с долиной в дневное время – это предложенные Титтериджем [117,146-148]. Они хорошо обоснованы физически и соответствуют существующим экспериментальным данным и локальным измерениям (подробное описание приводится в ссылках). Входные параметры для моделей – географическая широта, день года, местное время, Kp индекс и F10.7 индекс. Выходные – профиль электронной плотности на требуемых высотах более 80 км.

NeXtYZ не использует модельные профили напрямую: в алгоритм инверсии вводится набор поправочных коэффициентов, отсутствующих в моделях. Коэффициенты для видимых слоев представляют растяжения (сжатия) по плазменной частоте и реальной высоте и регулирование наклона профиля. В случае долины коэффициенты масштабирования должны избегать искажения отношения ширины к глубине модели долины. Непосредственные значения поправочных коэффициентов рассчитываются процедурой оптимизации вместе с параметрами первого клина выше моделируемой области.

Необходимо отметить избыточность набора основных параметров отражений, передаваемого диназондом в процедуру минимизации. Это приводит к появлению формальных ошибок [138]. Примерами источников таких погрешностей могут быть:

- (1) отклонения более высоких порядков от приближения плоской волны;
- (2) зависимость выше второго порядка фазы волны от частоты и времени;
- (3) низкое отношение (~10 децибелов) сигнал/шум, хотя обычно эта величина превышает 30 децибелов.

Обычно такие ошибки достаточно малы. Можно накапливать их на всех этапах процедуры NeXtYZ, однако общее влияние этих погрешностей нивелируется более существенной неопределенностью, связанной с постоянным присутствием в ионосфере мелкомасштабных неоднородностей. Во избежание перегрузки расчетов неэффективным формальным накоплением ошибки мы вместо этого обращаем внимание на погрешности представления реального ионосферного слоя результирующей КСИ моделью.

Неопределенность результата работы самой процедуры инверсии метода NeXtYZ оценивается погрешностью. Остаточное значение минимизируемой величины

$$\Delta R'_{i+1} = \sqrt{\sum_j (\rho'_{i+1,j} - R'_{i+1,j})^2},$$

относящейся к i -му клину, определяет качество оптимизации. Чем

меньше $\Delta R'_{i+1}$, тем точнее решение. При этом, минимальное значение остатка практически никогда не достигает нуля. Это можно считать статистической характеристикой остаточного локального (i -го клина) несоответствия между набором данных и решением, являющейся готовой оценкой локальной погрешности инверсии после преобразования ее величины из

виртуального значения в реальную высоту. NeXtYZ использует следующий коэффициент вычисления, основанный на усредненном измерении групповых путей распространения $\langle R'_j \rangle_{i+1}$ и на рассчитанном значении реальной высоты h_{i+1} , преобразуя неопределенность времени распространения $\Delta R'_{i+1}$ в ошибку реальной высоты Δh_{i+1} :

$$\Delta h_{i+1} = \Delta R'_{i+1} \cdot \left[(h_{i+1} - 80 \text{ km}) / (\langle R'_j \rangle_{i+1} - 80 \text{ km}) \right].$$

Ниже представлено несколько примеров, показывающих, что оценка погрешностей профилей электронной концентрации по описанному выше методу выявляет весьма ожидаемое поведение. Обращаем внимание, что погрешность измеряется в единицах высоты, потому что это – зависимая переменная в данном методе инверсии. Однако, вследствие того, что частотный градиент известен вдоль всего профиля, легко можно получить оценки погрешности в единицах частоты, более практикуемые в употреблении (например, в моделях подобия).

На рисунке 2.21 даны две ионограммы, полученные диназондом-21, и соответствующие им результаты восстановления профиля электронной концентрации для сравнительно спокойных ионосферных условий над обсерваторией Bear Lake, Юта, США (23.35 UT 3 декабря 2005г.), и умеренно возмущенных условий над обсерваторией EISCAT, Tromsø (12.30 UT 30 декабря 2005г.). Другие части, показывающие доплеровское смещение, эхолокацию, поляризацию и параметрические ошибки, опущены. Можно заметить, что погрешности существенно больше во втором случае, что указывает на увеличение пространственной возмущенности электронной концентрации в ионосфере.

Измеренная групповая дальность R' и вычисленный методом NeXtYZ вертикальный профиль Z как функция радио- (и плазменной) частоты (в МГц), соответственно, показаны с использованием логарифмических шкал. Цвета и номера следов идентифицируют классы радиоэхо: помеченные знаком '*' отобраны для процедур инверсии; помеченные знаком '<' не используются для инверсии. Врезка красной линией показывает восточно-западную компоненту n_x наклона поверхностей электронной концентрации, а синей линией – северную компоненту n_y , вычисленные NeXtYZ в «клиновидно-стратифицированной модели» как функции Z . Амплитудная панель (обозначенная знаком 'dB') показывает уровень сигнала и шума (черная линия). Величины погрешностей на профиле (а) малы в спокойной ионосфере и (б) увеличиваются в присутствии "spread F".

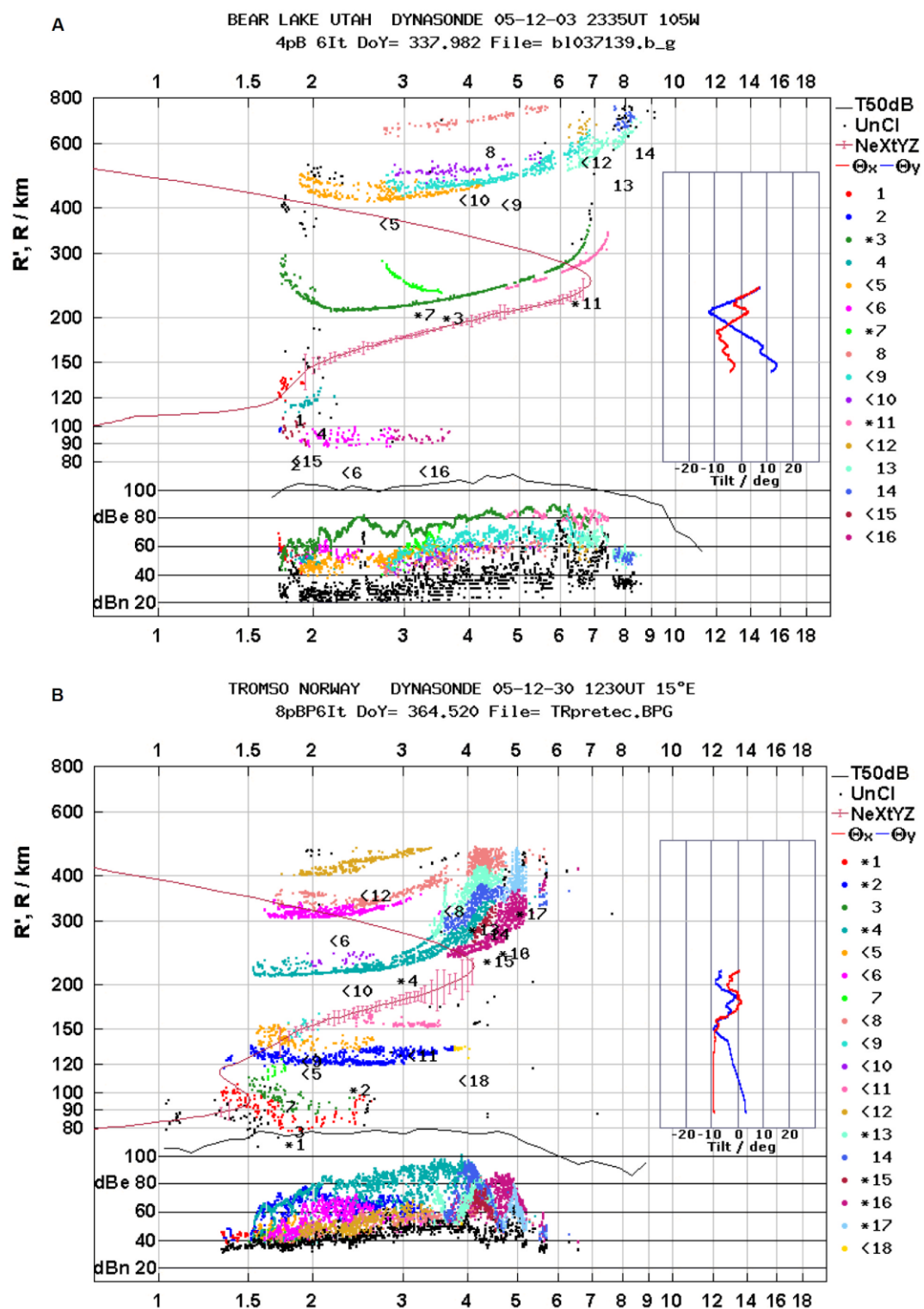


Рисунок 2.21 - Верхняя панель стандартного изображения ионограммы Диназонда 21. Обозначения такие же, как на рисунке 2.18

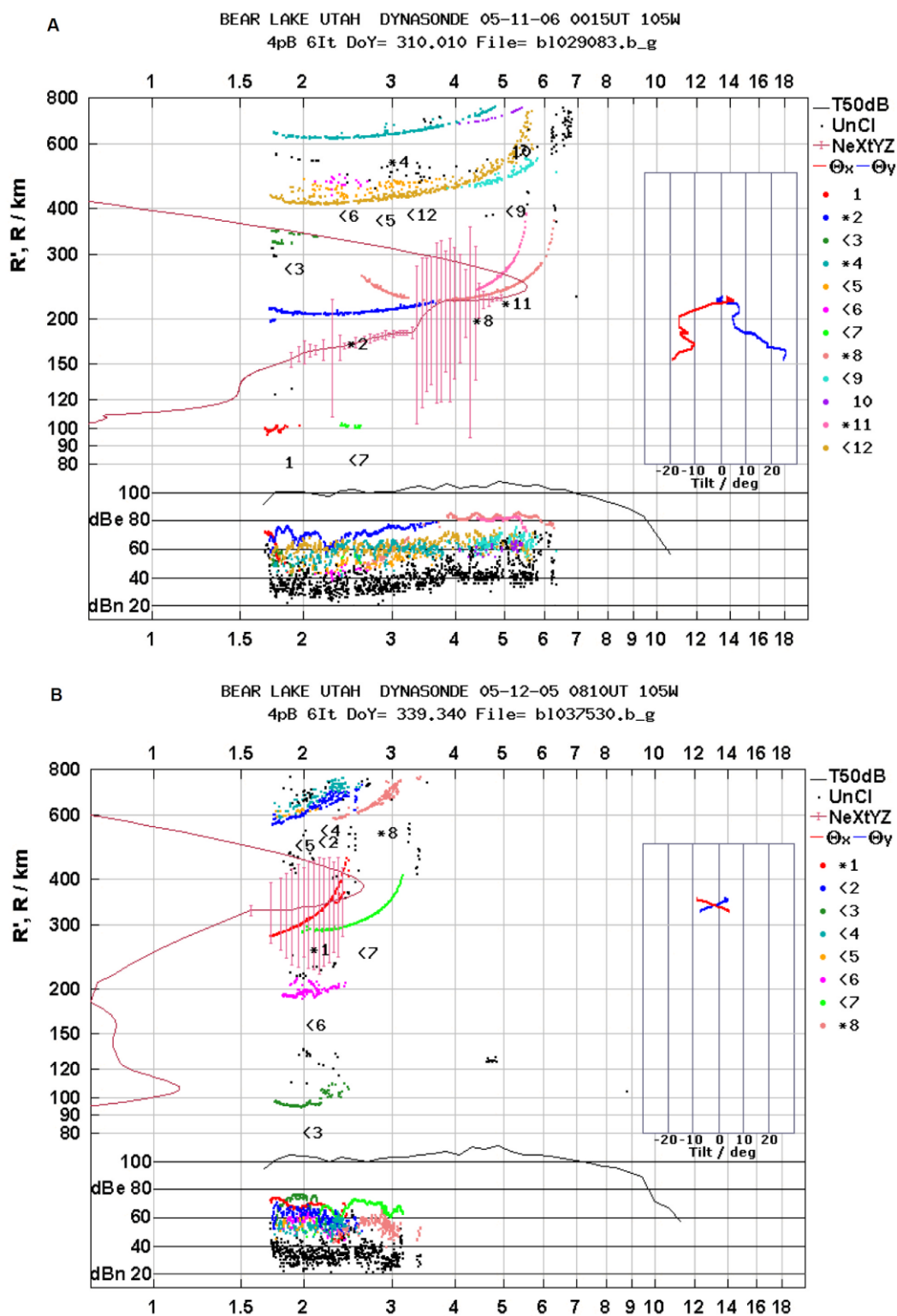


Рисунок 2.22 - Поведение NeXtYZ в присутствии "грубых ошибок", совершенных алгоритмом выбора следов. (а) след 4 является "кратным" отражением от F-области следа 2, ошибочно заданным для использования NeXtYZ. Оба следа вносят вклад в профиль; большие погрешности следуют из противоречий между O- и X- волнами в области их наложения. (b) след 8, являясь "кратным" отражением Fx (след 7), ошибочно задан вместо него. NeXtYZ получает неправильный профиль, но с полностью разумными погрешностями

На рисунке 2.21 представлены примеры влияния величин погрешностей NeXtYZ на случайные грубые ошибки процедуры отбора следов для инверсии. Выбор следа – часть алгоритма анализа данных диназона DSND, который готовит входную информацию для последующей обработки, включающей NeXtYZ. Все автоматизированные методы инверсии профиля иногда сталкиваются с подобными проблемами и большинство методов либо совсем отказывают, либо выдают неправильные результаты без указания возможной погрешности. Стандартная реакция NeXtYZ – значительное увеличение возможной погрешности для соответствующей части профиля. Эта особенность алгоритма инверсии позволяет напрямую контролировать качество полученных результатов, что является важной деталью при эксплуатации.

Подводя итоги рассмотрения подхода к вычислению ошибки, осуществленного в NeXtYZ, можно заметить, что погрешности, полученные этим методом, относятся только к конкретной части восстанавливаемого профиля. Важно и то, что в NeXtYZ вклад в величину погрешности для каждого клина вносит большое количество отражений (обычно несколько десятков), так что полученная ошибка имеет тенденцию к гауссовской статистике. Обе эти особенности NeXtYZ соответствуют соглашениям, принятым для современных методов решения подобных задач, основанных на модели фильтра Кальмана.

Для тестирования полной версии NeXtYZ алгоритма использовались наборы модельных данных. Сначала определяется невозмущенный вертикальный $f_p(h)$ -профиль, состоящий из параболических сегментов. В модели КСИ профиль определяется последовательностью структурных плоскостей, положение которых меняется, когда задается модель возмущения. Для соответствия "спокойному состоянию" ионосферы на модельное крупномасштабное распределение Ne накладываются низкоамплитудные ($\Delta N/N \sim 0.2\%$) мелкомасштабные (1-2 км) неоднородности. Наконец, выполняются многократные трехмерные траекторные расчеты лучей с некоторым малым шагом по частоте, чтобы промоделировать ионограммный набор лучей, вернувшихся в точку выхода. Результатом является весьма реалистичный набор отраженных лучей с известными амплитудами, временами распространения и углами прихода.

Входной информацией для NeXtYZ являются смоделированные параметры отражений. На рисунке 2.23 даются результаты сравнения модельных и экспериментальных $f_p(h)$ -профилей. Отличием является представление кроме них компонент вектора нормали к плоскости n_x и n_y . Это позволяет подтвердить удовлетворительное восстановление $f_p(h)$ -профиля и наличие особенности вблизи максимума F-слоя или у профиля в области долины,

где отсутствует информация о наклоне. В этом случае проявляется еще одна особенность алгоритма, а именно, его устойчивость (правый график рисунка 2.23) даже по отношению к такой глобальной помехе, как неадекватная модель долины. Модель КСИ, использованная для моделирования, представлена сплошными линиями. Вертикальный профиль распределения $f_p(h)$ и высотная зависимость двух компонентов вектора нормали к плоскостям $\mathbf{n}$, рассчитанные по NeXtYZ, обозначены линиями, состоящими из сплошных кружков. Для дневного случая инверсия была сделана без точного моделирования долины, согласно предположению о монотонном профиле. Существенные отклонения NeXtYZ-решения вызваны только неадекватной моделью долины.

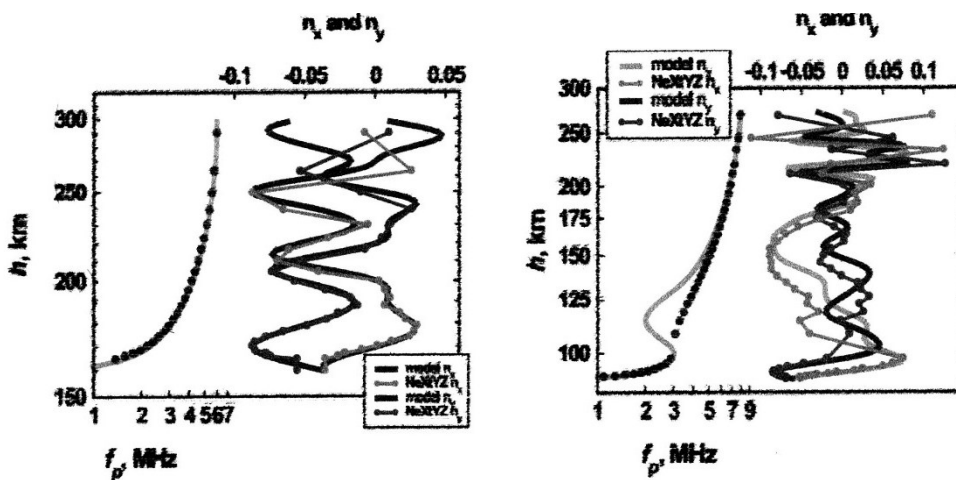


Рисунок 2.23 - Результаты NeXtYZ инверсии по модельным данным для (слева) ночных условий (присутствует только параболический F слой) и (справа) дневных условий

Общий алгоритм NeXtYZ (NeXtYZ-Full) выдвигает значительные требования в вычислительном отношении, что предполагает полезность "облегченной" версии (NeXtYZ-Lite), в которой наклон в областях E и F принимается постоянным, но не обязательно одинаковым. Наклоны определяются в начале процедуры инверсии усреднением углов прихода отраженных сигналов, относящихся к каждой области. Плавный переход между наклонами происходит в E-F долине. Это приводит к тому, что неизвестными в процедурах оптимизации являются только вертикальные положения структурных плоскостей модели КСИ, но не компоненты их векторов нормали. Все другие свойства процедуры инверсии, описанные в предыдущих разделах, в Lite-версии отражены в полном объеме. В частности, все траекторные расчеты являются трехмерными: Измерения углов прихода лучей используются в этих вычислениях, как начальные условия, и пределы погрешности определены тем же способом.

Несмотря на грубое решение NeXtYZ-Lite в описании высотной зависимости ионосферных наклонов по сравнению с NeXtYZ-Full, оно все еще приводит к результатам, не

доступным другим алгоритмам восстановления профиля $f_p(h)$: получены средние углы наклона E- и F-слоев, а также рассчитываются реальные пространственные координаты точек отражения для всех отраженных лучей. Характерные особенности NeXtYZ-Full сохранены в NeXtYZ-Lite, таким образом, его особенности состоят в следующем:

1. Отсутствие неточностей обработки эффектов, связанных с магнитным полем и вызванных предположением о вертикальности распространения лучей. Удовлетворено требование [137] о том, что углы наклона играют значительную роль в случае, если корректировка долины (днем) и ночной E-области проводится при совместном анализе отражений O- и X-поляризации.

2. Равноправное использование O- и X-лучей, позволяющее улучшить параметры недостаточно засвеченных областей (рис.2.24).

3. Использование современных моделей описания начала ионосферы и E-F долины.

4. Процедура NeXtYZ предоставляет обширную статистическую информацию для оценки погрешностей $f_p(h)$ профиля.

Как и любой алгоритм, NeXtYZ нужно было протестировать. Такое тестирование было проведено по данным dynasonde-21 в реальном времени в период с декабря 2004 г. до 8 марта 2005 г. В результате проверочный файл NeXtYZ-Lite стал стандартной частью автоматизированной программы анализа данных dynasonde-21 DSND, а в ноябре 2005 этот статус получил NeXtYZ-Full. Теперь все другие программы используют инверсию. В течение тестирования результаты анализа были доступны на Web сайте dynasonde <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/IONO/Dynasonde/>. Они доступны и сейчас на этом сайте. В целом, обработка более 225 000 ионограмм показала преимущества NeXtYZ алгоритма в виде большей однородности профилей и их устойчивости к плохим или недостаточным данным, чем профили, рассчитанные методом POLAN.

Параллельно с развитием метода проводилась оптимизация кода NeXtYZ. И теперь время анализа ионограмм занимает ~2.5 мин на стандартном PC с процессором Pentium-4 3.4 ГГц для NeXtYZ-Full и 0.5 мин для NeXtYZ-Lite, т.е. обе версии могут использоваться для оперативной службы.

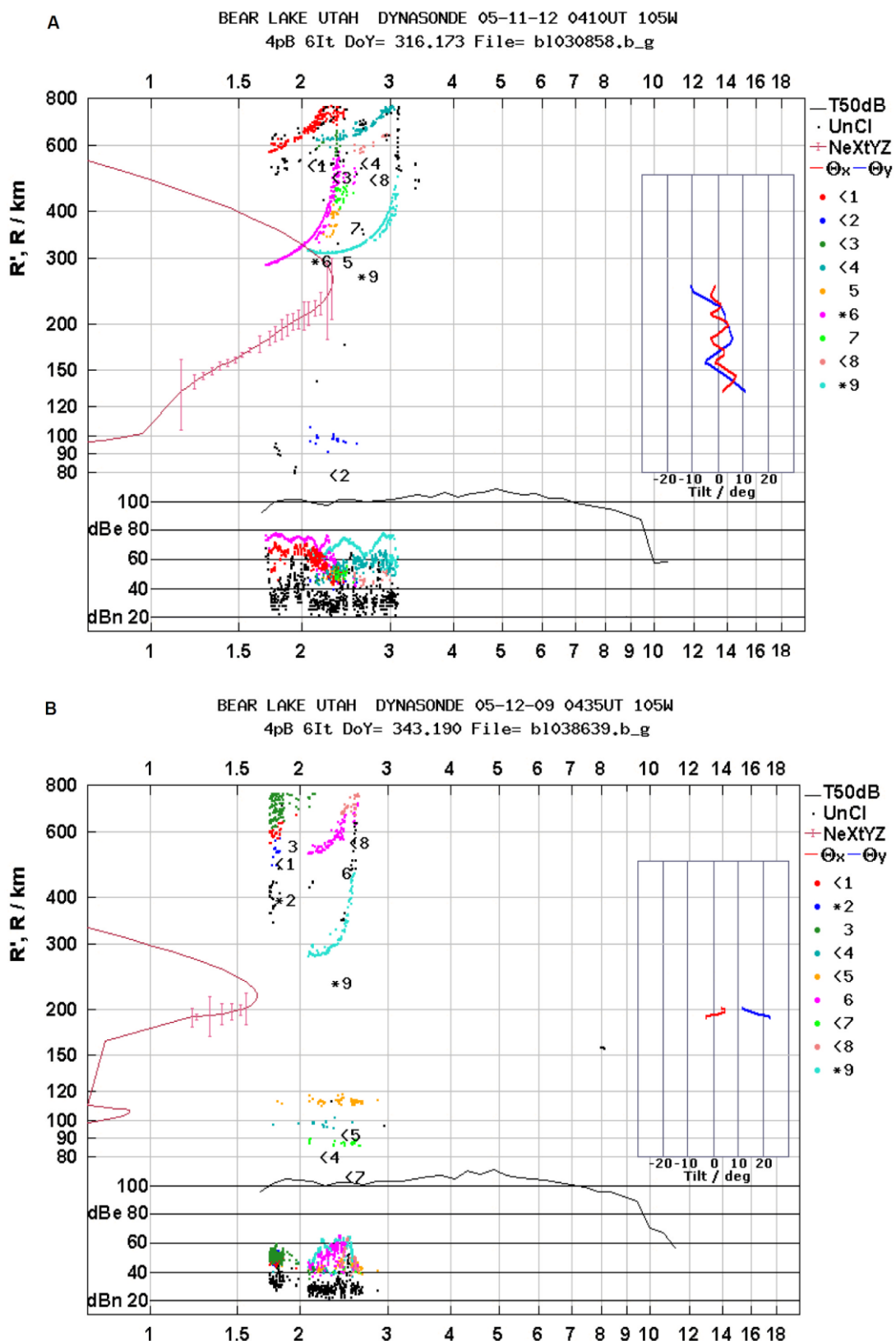


Рисунок 2.24 - Отражения волн необыкновенной поляризации (a,b) помогают корректировать модель Титтериджа [135,136] для E-области в ночное время и (b) обеспечивают единственную информацию для F-области в отсутствие эхо обыкновенной поляризации

В заключение раздела можно отметить следующее.

Причины, указанные ниже, определили необходимость кардинальной модификации существовавшего метода ионосферного зондирования с его специальной "селективностью уровня отражения" во всем частотном диапазоне. Комплекс NeXtYZ реализовал огромный потенциал этого зондирования в части учета пространственных масштабов и амплитуд горизонтальных градиентов электронной плотности, определяющих появление радиомерцаний, ошибок и отказов GPS, ошибок в навигационных и локационных измерениях и др. Законченное развитие ядра NeXtYZ – полного трехмерного алгоритма – позволяет заменить POLAN при восстановлении профиля электронной концентрации, поскольку разнообразные типы тестирования с декабря 2004 в режиме реального времени показали удовлетворительные результаты.

Нужно подчеркнуть, что созданию NeXtYZ-модели способствовали два главных обстоятельства. Во-первых, высокая плотность, обеспечиваемая программой анализа данных диназонда и составляющая несколько тысяч отражений на ионограмме, для каждого из которых получены точные физические параметры. И решение проблемы оптимизации для каждого "клина". Во-вторых, быстродействие современных РС, позволяющее обрабатывать данные ионограмм в режиме реального времени и в течение разумного времени (0.5–2.5 минуты) без дорогих решений аппаратных средств ЭВМ.

Диназонды нашли широкое применение для получения новых данных о поведении ионосферы [152-154].

Представленные результаты опубликованы в [12,13,111,112,155,156].

2.3.2. Влияние мелкомасштабных ионосферных неоднородностей на поведение сигналов радиозондирования

Многочисленными экспериментами было показано, что мелкомасштабные неоднородности оказывают большое влияние на ионограммы и распространение радиоволн, особенно сильно в экваториальных областях. В данном разделе представлены результаты численного моделирования доплеровских измерений и основанные на них определения векторных скоростей для экваториальной ионосферной F области. Смоделирована типичная ситуация, когда область E ионосферы заполнена мелкомасштабными неоднородностями, вызванными экваториальным электроджетом и двигающимися со скоростью, не равной скорости F области. Неоднородности в ионосферных слоях смоделированы мелкомасштабными (~2 км) квазиволновыми структурами и движения слоев смоделированы движениями этих структур (1.50). Параметры сигналов радиозондирования определены в соответствии с многократными численными решениями расширенной системы лучевых

уравнений.

Постановка задачи сводится к следующему. В случае радиозондирования ионосферы с мелкомасштабными неоднородностями радио-эхо на каждой плазменной частоте является суперпозицией многократных рассеянных отражений в некотором контуре (соответствующих отдельному значению зондирующей частоты). Каждое эхо характеризуется, среди других взвешенных физических параметров, углами его прихода (или единичным волновым вектором $\mathbf{n}$) и доплеровским сдвигом Δf , выражаемым через скорости v^* стандартным соотношением $2v^*/c = \Delta f/f$. Эти эхо, даже имея отношение к различным частотам, могут быть объединены в статистическом ансамбле, чтобы оценить среднюю векторную скорость плазменных контуров $\mathbf{V}$ в некотором ионосферном слое, минимизируя следующее выражение

$$\sum_i (\mathbf{V} \times \mathbf{n}_i - v_i^*)^2.$$

Основное предположение, лежащее в основе этого подхода, заключается в том, что наблюдаемые доплеровские значения могут быть приписаны уровню отражения и что они представляют проекцию векторной скорости этого уровня на наблюдаемое направление распространения.

Такой подход работает достаточно хорошо для средне- и высокоширотной ионосферы, где основные слои соединены через силовые линии магнитного поля. На рисунке 2.25 видно, что слои дрейфуют вместе ($\mathbf{V}_F = \mathbf{V}_E$). В экваториальной ионосфере слои слабо соединены из-за преобладания горизонтальной ориентации магнитного поля. Это создает возможность для различного дрейфового движения плазменных слоев ($\mathbf{V}_F \neq \mathbf{V}_E$). Иллюстрация приводится на рисунке 2.26.

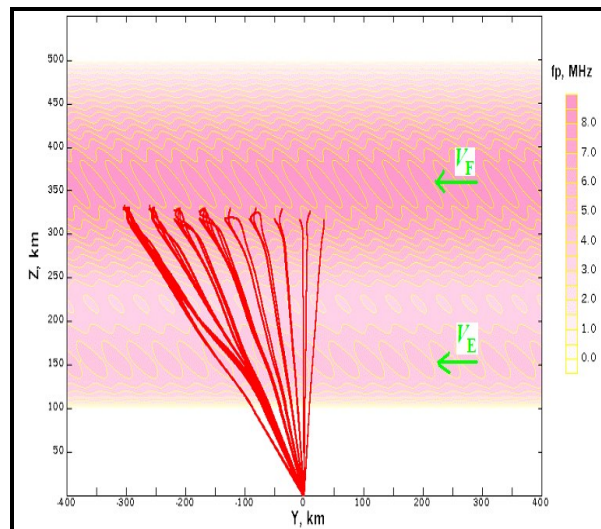


Рисунок 2.25 - Движение слоев в средне- и высокоширотной ионосфере

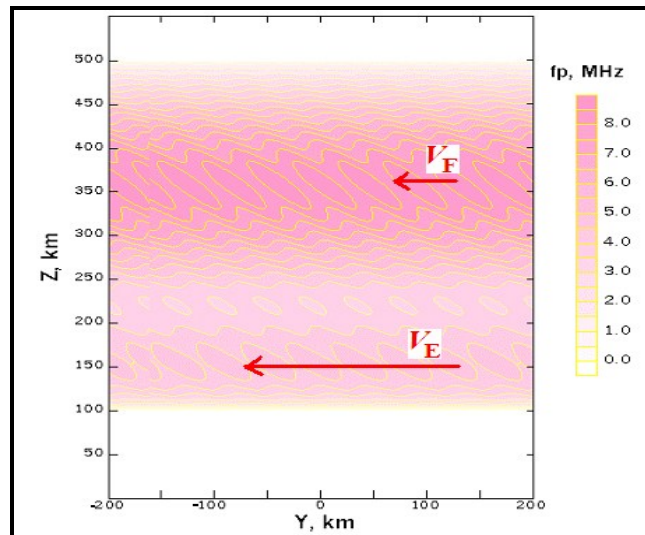


Рисунок 2.26 - Движение слоев в экваториальной ионосфере

Кроме того, экваториальная Е-область обычно характеризуется повышенным уровнем мелкомасштабных неоднородностей, вызванных экваториальным электроджетом (EEJ).

В данном исследовании используется численное моделирование с целью показать, что отличия в движении Е-слоя с типичными амплитудами неоднородностей [157] достаточны, чтобы создать существенные отклонения в оценках векторной скорости F-области.

Методика численного эксперимента предполагает, что невозмущенный профиль ионосферы $N_0(z)$ задается простой функцией с двумя максимумами (как показано на рисунке 2.27).

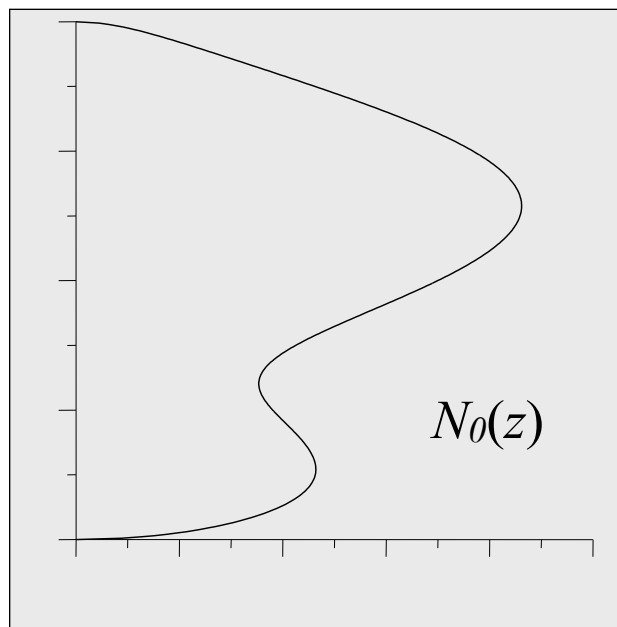


Рисунок 2.27 - Модель невозмущенного профиля ионосферы

Мелкомасштабные неоднородности описываются независимо для Е- и F-областей ионосферы, используя простые гармонические колебания, движущиеся в горизонтальном

направлении:

$$N(\mathbf{r}, t) = N_0(z) \cdot \left\{ 1 + \delta_{E,F} \cdot \exp \left[\frac{(z - z_{E,F})^2}{H_{E,F}^2} \right] \cdot \sin \left[-\frac{V_{E,F}}{\Lambda_{E,F}} t + \frac{2\pi}{\Lambda_{E,F}} \cdot x \right] \right\}, \quad (2.3)$$

где $\Lambda_{E,F}$ – масштаб неоднородностей (принятый равным 2 км); Это движение в горизонтальном направлении смоделировано в соответствии с движением нерегулярной структуры в x направлении со скоростью слоя $V_{E,F}$; $\delta_{E,F}$ – амплитуда неоднородности, $H_{E,F}$ – полутолщина слоя неоднородности, $z_{E,F}$ – максимум высоты слоя. Неоднородности бесконечно вытянуты вдоль магнитного поля в y направлении.

После задания ионосферных параметров выполняется многократный расчет лучевых траекторий в плоскости (x, z) (перпендикулярной к магнитному меридиану) на выбранной частоте (соответствующей отражению от F-области). Определяются параметры всех лучей, вернувшихся в точку излучения (подобно показанным красным цветом на рисунке 2.25). Направления их прихода и доплеровские значения используются для определения скорости движения F-области согласно стандартной процедуре, описанной в предыдущем разделе.

На рисунке 2.28 показаны некоторые результаты численных расчетов скорости F-области, которые были бы получены в соответствии со стандартной методикой в присутствии иначе движущегося E-слоя. Амплитуда неоднородностей была задана и для E-, и для F-области на относительно низком уровне (0.5 % или 0.005). Даже в этом случае наблюдается хорошо выраженная зависимость от скорости E-области. Расчеты проводились для трех радиочастот (5, 6 и 7 МГц), и, как ожидалось, эффект E слоя является наиболее значимым для более низких частот.

Следует заметить, что истинное значение скорости F-области (50 м/с) получается (с точностью ~ 4 м/с) только в случае, когда скоростью E-области были также 50 м/с. Когда скорость E-области уменьшается, приближаясь к 0, скорость F-области занижается, наиболее значительно (с коэффициентом ~ 0.5) в случае самой низкой частоты 5 МГц. Когда скорость E-области становится выше, чем в F-области, эффект увеличения немедленно появляется в промоделированных значениях V_F . Для всех трех частот расчетные значения почти всегда пропорциональны величине скорости E-области, несмотря на отражение этих сигналов в F-области. Для более высоких частот эффект слабее, но отклонения все еще очень существенны. Для всех трех частот заметно некоторое "насыщение" влияния эффекта E-области для более высоких скоростей; причина и реальность этого эффекта пока не ясны.

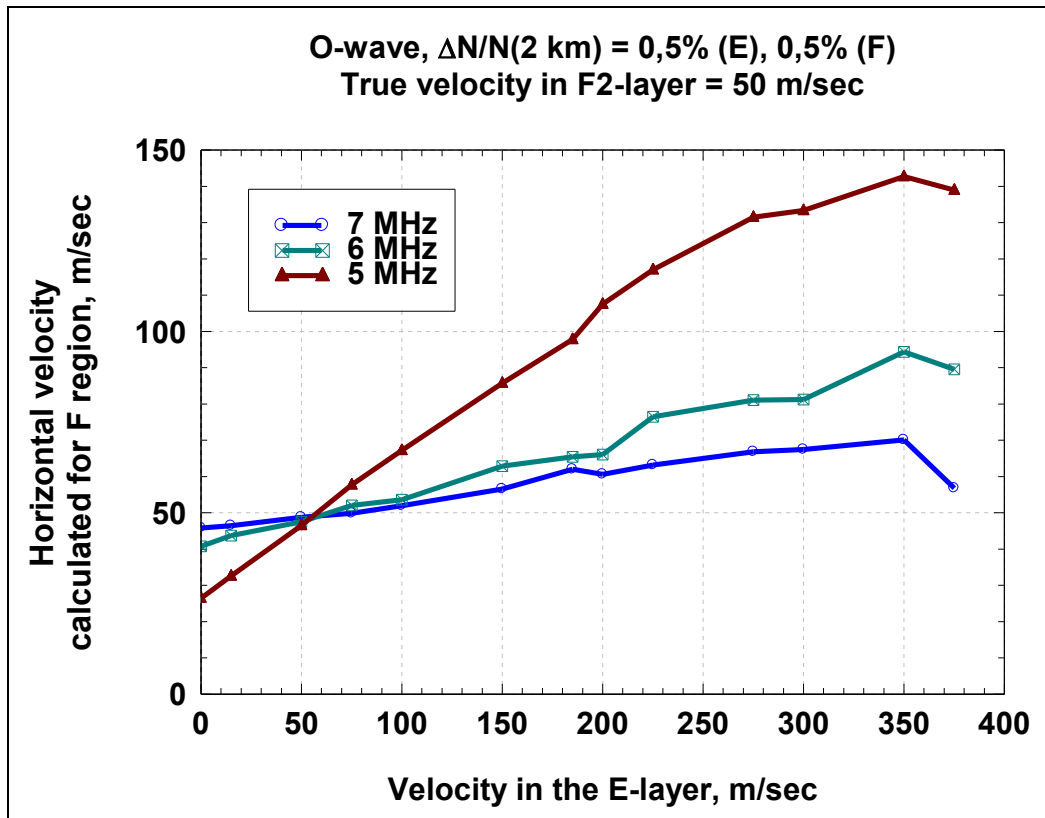


Рисунок 2.28 - Зависимость расчетных скоростей F-области от скорости движения E-области

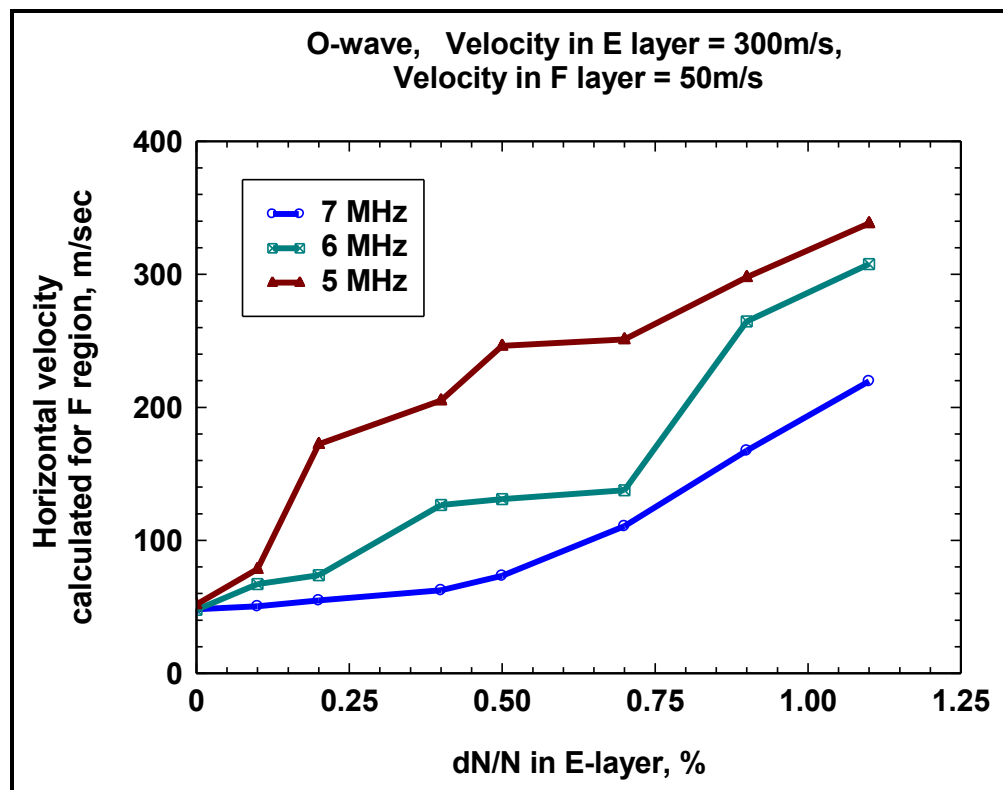


Рисунок 2.29 - Зависимость расчетных скоростей F-области от амплитуды возмущений в E-области

Рисунок 2.29 демонстрирует другую особенность влияния Е-области: его зависимость от амплитуды неоднородностей Е-области. Модельные значения обеих скоростей были фиксированными ($V_F = 50$ м/с, $V_E = 300$ м/с) вместе с амплитудой неоднородностей F-области δ_F , а амплитуда неоднородностей Е-области δ_E изменялась.

Видна общая тенденция усиления эффекта Е-области с увеличением δ_E . Когда $\delta_E = 0$, для всех трех частот получаются истинные значения скорости F-области. Видна определенная зависимость скорости F-области от частоты: для 5 МГц она пропорциональна отношению V_F к амплитуде неоднородностей δ_E , а для самой высокой частоты, 7 МГц, зависимость появляется, когда δ_E достигает 0.5 %, но после этого эффект становится весьма заметен.

Сравнение с экспериментами было проведено по данным двух дигизондов: Jicamarca (DPS4) и Нуансауо (диназонд). Для первого случая взят рисунок 2.30 из работы [158]. Сравнивалось среднее значение зонального дрейфа F-области в Jicamarca с данными радара некогерентного рассеяния ISR (•) и ионосферным зондом (DPS4) (с погрешностью) для 1 апреля 2004 (слева) и 16 июня 2004 (справа). Кроме того, показана величина зонального дрейфа EEJ неоднородностей (Δ), рассчитанного независимо на частоте 50 МГц системой COCO.

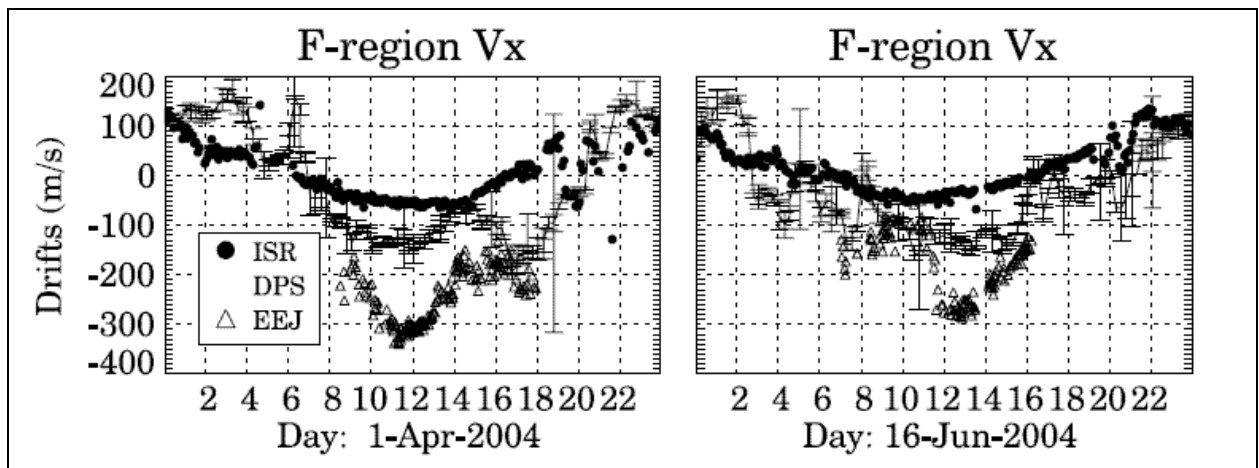


Рисунок 2.30 - Среднее значение зонального дрейфа F-области в Jicamarca [158]

Замечено, что зональные скорости F-области, рассчитанные по HF отражениям, фактически никогда не совпадают с истинными значениями (полученными ISR) и имеют сильную тенденцию отклоняться к векторным скоростям дрейфа Е-области. В частности, в середине дня, когда скорость EEJ неоднородностей порядка -300 м/с, а истинная скорость дрейфа F-области -50 м/с, измерения ионосферного зонда приводят к -100 ...-150 м/с, что находится в хорошем качественном соответствии с нашими результатами моделирования,

показанными на рисунке 2.28.

Во втором случае во время эксперимента CONDOR в Нуансаю (март 1983) за 5 дней было получено несколько неустойчивых данных. На рисунке 2.31 представлены средние дневные изменения компонент векторной скорости в магнитной системе координаты для E-области (штриховые линии; только дневное время) и F-области (сплошные линии). Присутствует также величина "%PV", которая является процентом отклонения v^* от результирующего вектора скорости.

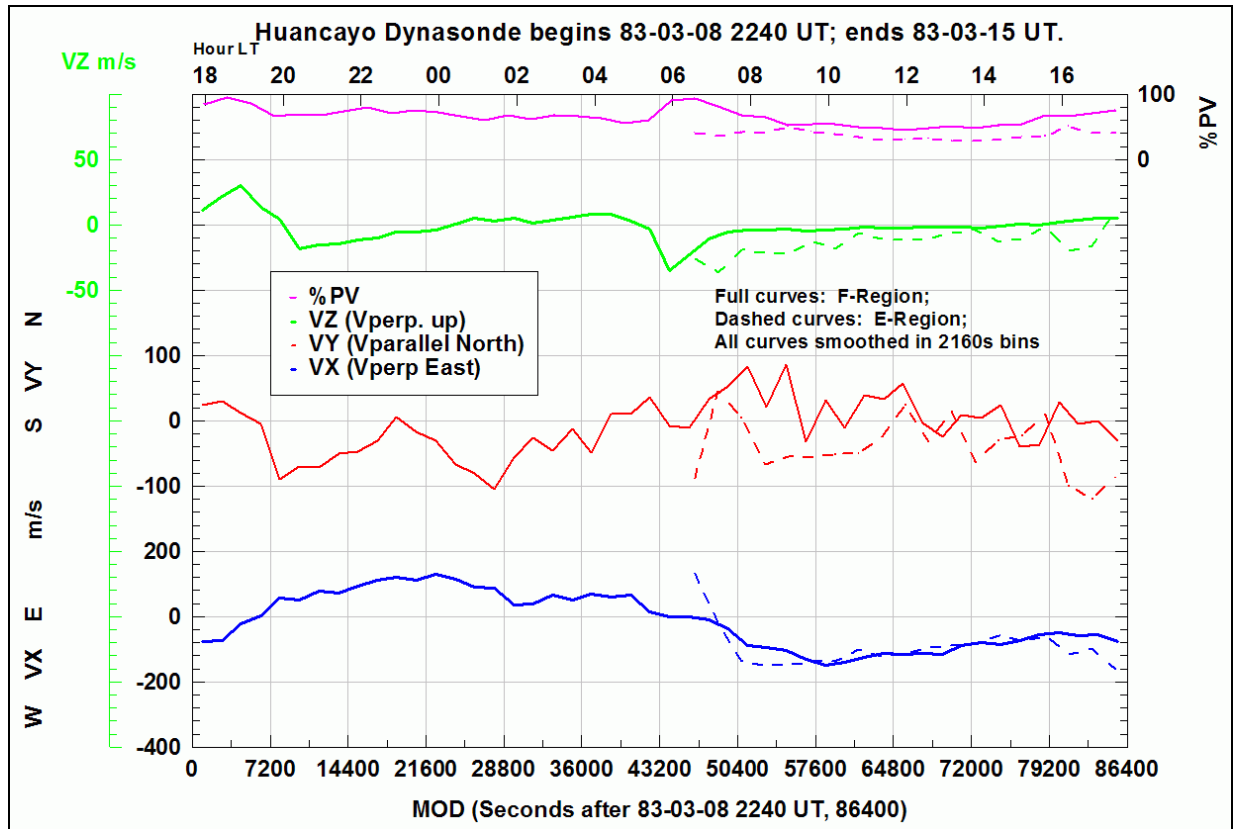


Рисунок 2.31 - Результаты эксперимента CONDOR в Нуансаю

Видно, что V_X фактически одинакова для E и F-областей днем, что может быть свидетельством ошибки результатов для F-области вследствие влияния EЕJ неоднородностей E-области.

Обращает на себя внимание то, что количественные различия между представленными экспериментальными результатами дигизонда, диназонда и результатами моделирования можно частично объяснить различиями между используемыми радиочастотами (или радиочастотами, обеспечивающими наибольшие вклады в результат для дигизонда, тогда как в случае диназонда измерения векторных скоростей сделаны ионограммным способом).

Эти результаты приводят к следующим выводам. Если векторные скорости F области

рассчитываются из доплеровских измерений и приписываются уровню отражения в соответствии со стандартной процедурой, то в присутствии E-области, движущаяся с другой скоростью, они могут иметь существенные отклонения. Величина этих различий зависит не только от разницы векторных скоростей E-F, но также и от амплитуды неоднородностей E-области.

Этот результат находится в качественном и количественном соответствии с экспериментальными наблюдениями [138]. Обоснована потребность в специальной процедуре инверсии для того, чтобы получить векторные скорости, которая должным образом учитывает отличия в движениях ионосферных слоев.

Приведенные результаты моделирования показывают, что при различном горизонтальном движении ионосферных слоев нижележащие слои могут сильно влиять на доплеровские характеристики ВЧ-радиоволн, отраженных от верхних слоев. Для упрощенных методов обработки погрешности в оценке векторной скорости зависят от разности скоростей слоев и от амплитуды мелкомасштабных неоднородностей, присутствующих в нижележащих слоях.

Это не подразумевает, что техника ВЧ-отражения непригодна для определения скорости дрейфа F-области в экваториальных широтах. А только говорит о том, что нужно с осторожностью относиться к результатам, полученным с помощью упрощенной схемы обработки данных.

Результаты опубликованы в [112,159].

2.4. Выводы

В данной главе решались 3 проблемы, связанные с вертикальным зондированием ионосферы: 1) наличие диффузных отражений, 2) существующие методы обработки ионограмм являются закрытыми коммерческими продуктами, что создает трудности для использования их результатов в дальнейших исследованиях, 3) наличие неоднородностей приводит к необходимости рассмотрения 3-х мерной задачи.

. Первая проблема решена разработкой программного комплекса «Viewer», отличающегося автоматизацией обработки. Решением второй проблемы являлась разработка новых методов восстановления Nh-профилей, основанных на алгоритмах траекторных расчетов, представленных в главе 1. Для решения третьей проблемы предложен метод восстановления 3-х мерного распределения, реализованный в Dynasonde-21.

Основные результаты можно суммировать следующим образом.

1. Определены причины необходимости совершенствования методов обработки данных вертикального зондирования для повышения точности расчета $N(h)$ -профилей ионосферы.
2. Предложены новые методы восстановления $N(h)$ -профилей, в том числе процедуры автоматизации, для повышения точности.
3. Разработана модификация ПО ионозонда DPS-4 в виде комплекса «Viewer_DPS4» с двумя модулями: «Fspread-18» для режима наблюдений и «LocalDrift» для работы с отдельными группами отраженных эхо-сигналов в исследовательском режиме, что является отличительной особенностью комплекса «Viewer_DPS4».
4. Разработаны принципы построения, функционирования нового инструмента dynasonde-21, включающие алгоритмы, программу NeXtYZ и соответствующие результаты. Показано, что алгоритм NeXtYZ является более устойчивым к плохим или недостаточным данным и его использование позволяет наиболее точно определять не только трехмерную структуру распределения электронной концентрации, но и погрешность на каждом шаге процедуры и, в целом, доплеровские сдвиги и скорости дрейфа.
5. Новым физическим результатом является объяснение наблюдения F-рассеяния в экваториальной зоне различием скоростей горизонтального движения плазмы в слоях E и F.

Результаты главы опубликованы в работах [12,111,114,121,122,130,131,160,161] и были представлены на международных и всероссийских конференциях [13,112,123-127,129,132-135,155,156]. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [119].

Глава 3. Формулировка и обоснование принципа учета неоднородностей ионосферной плазмы на примере сложных ионограмм ИСЗ ИК-19

В рамках Федеральной космической программы России были разработаны и выведены на орбиту в составе космической группировки четыре спутника "Ионосфера-М", оснащенных спутниковыми ионозондами ЛАЭРТ. Эти спутники обеспечивают постоянное покрытие земной поверхности и позволяют наблюдать за изменениями в ионосфере в различных регионах планеты. Первый парный запуск состоялся 5 ноября 2024 года, второй – 25 июля 2025 года. Спутники находятся на солнечно-синхронных орбитах, время пересечения экватора для первой пары 09–21 LT, время второй 03–15 LT. Орбиты находятся под 90° градусов друг к другу по долготе.

Очевидно, что, в связи с этим, изучение ионосферы методом внешнего зондирования становится важнейшей задачей. В данной главе на основе данных спутника ИК-19 будут рассмотрены возможности применения принципов спутникового зондирования к диагностике ионосферы, в частности при наличии в ней неоднородностей различных типов. Это исследование может являться предварительным теоретическим этапом процесса обработки и интерпретации новых ионограмм, полученных в ближайшее время.

ИСЗ Интеркосмос-19 (ИК-19) был выведен на эллиптическую орбиту с высотами от 500 до 1000 км и наклоном 74° в марте 1979, активно работал и передавал данные по февраль 1982 г. [162]. На борту спутника ИК-19 действовала ионосферная станция, работавшая на 338 фиксированных зондирующих частотах в диапазоне от 0.3 до 15.95 МГц.

С его помощью была впервые установлена возможность непрерывного глобального картирования ионосферы. В этой миссии, проработавшей до середины 1982 года, использовался внешний зонд ИС-338. Отличительной особенностью этой платформы была её обширная возможность регистрации данных, позволяющая непрерывно собирать телеметрические данные со всех бортовых датчиков в течение 16 часов между последовательными сеансами загрузки данных. Эта особенность превратила «Интеркосмос-19» в полноценную систему мониторинга, способствуя проведению глобальных исследований и изучению суточной ионосферной изменчивости. Обработка основного массива данных производилась в цифровом виде, в редких случаях (в пределах видимости наземного приемного пункта) – в аналоговом. Всего за период активной работы ИК-19 было снято свыше 300 000 ионограмм.

Особенностью цифровых ионограмм являлось то, что блоком промежуточной памяти на каждой частоте фиксировались только 3 первых отражения. Около половины снятых и

обработанных ионограмм были получены в спокойных условиях и соответствовали классическому представлению. Пример ионограмм хорошего качества приведен на рисунке 3.1.

Видно, что можно выделить следующие основные структурные элементы ионограммы внешнего зондирования:

- 1) следы отражений обыкновенной (О) и необыкновенной (Х) волн,
- 2) короткий след Z-волны,
- 3) критические частоты F2-слоя (f_oF2 и f_xF2),
- 4) частоты отсечки всех трех мод на высоте спутника (f_z, f_n, f_x).

Среди плазменных резонансов основными являются:

- 1) удаленный резонанс (УР),
- 2) плазменный пик (f_n или f_p),
- 3) верхний гибридный резонанс (f_{UHR} или f_{VGR}),
- 4) четыре гармоники гирочастоты (f_H).

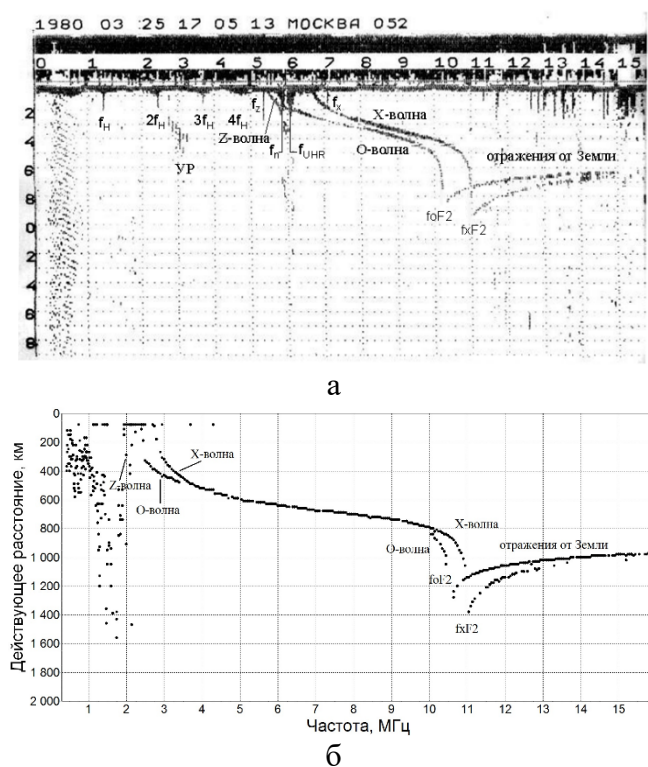


Рисунок 3.1 - Аналоговая (а) и цифровая (б) ионограммы хорошего качества, зафиксированные на борту ИК-19

Особенностью остальной части базы ионограмм спутника ИК-19 является наличие сложных ионограмм внешнего зондирования с дополнительными следами отражения от различных ионосферных структур. Их интерпретация представляет и трудность, и большой интерес. Примеры таких ионограмм приведены на рис.3.2.

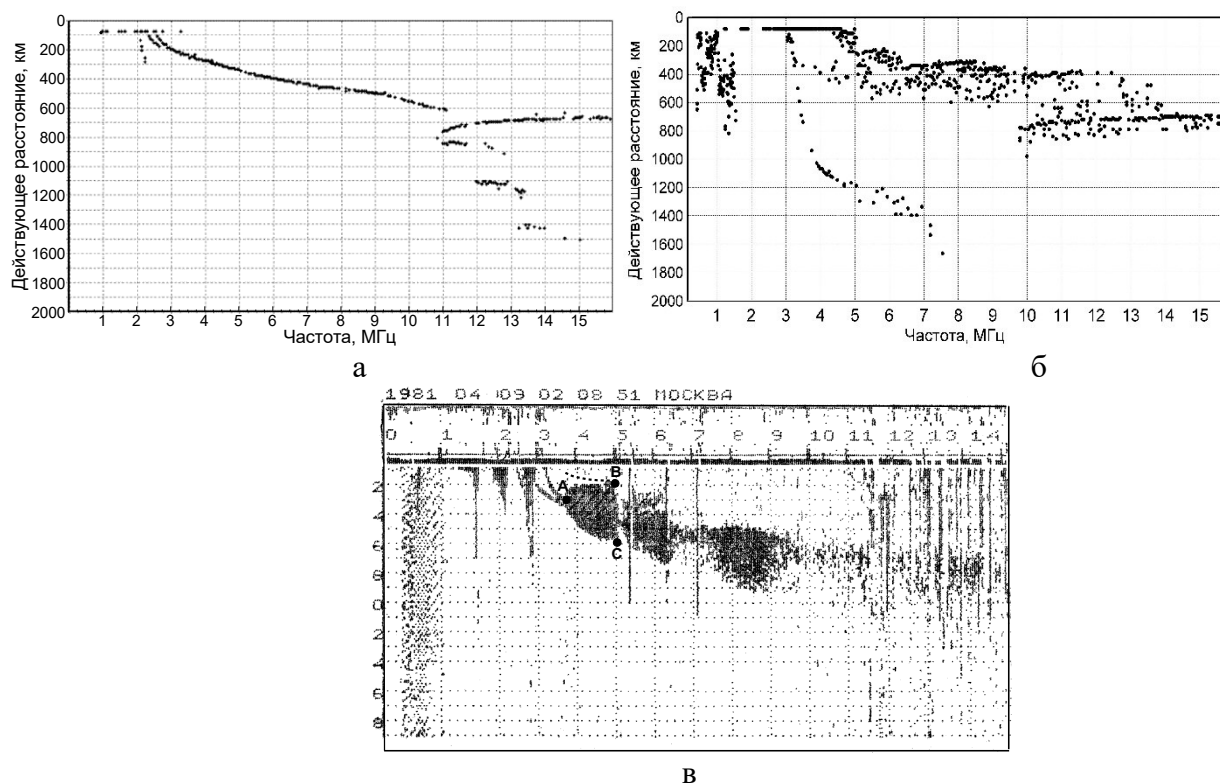


Рисунок 3.2 - Примеры сложных ионограмм, зафиксированных на борту ИК-19

Из рисунка 3.2 видно, что на ионограммах внешнего зондирования могут фиксироваться как четко выраженные дополнительные следы (рисунок 3.2а), так и размывание (полное или частичное) основных следов (рисунок 3.2в) либо смещение их частотных границ относительно классического представления. Часто оба эти явления могут проявляться одновременно (рисунок 3.2б). Дополнительный анализ показал, что подобные ионограммы присутствуют на всех широтах, охватываемых спутником. Также не было выявлено явной зависимости от магнитной и солнечной активности, хотя чаще они наблюдаются в периоды высокого значения Кр-индекса.

Из изложенного следует, что основной проблемой внешнего зонд является интерпретация сложных ионограмм ИК-19, связанных с неоднородностями. Второй проблемой является восстановления Nh-профилей ионосферы, расположенных выше высоты максимума слоя F2.

Целью настоящей главы является решение этих проблем, т.е. обнаружение и интерпретация типичных примеров таких ионограмм и определение соответствующих профилей, которые будут представлены в каждом разделе. Можно предположить, что дополнительные следы и увеличение частотного диапазона основного следа вызваны наличием крупномасштабных возмущений ионосферы вблизи траектории движения спутника, а уширение следов связано с присутствием мелкомасштабных неоднородностей. Также с помощью численного моделирования ионограмм будет показано, что по форме и

расположению таких следов можно с большой уверенностью определить, какая неоднородная структура приводит к их созданию.

Поскольку ионограммы спутника ИК-19 имеют сложный характер, то, как показано в работе [148], их интерпретацию нужно разбить на несколько этапов. Первый этап включает выделение необычных следов, отличающихся такими параметрами, как наличие рассеяния, частотный и высотный диапазоны, различная динамика поведения сигнала. Если таких случаев наблюдается достаточно много, то необходимо определить дополнительные характеристики таких следов, которые могут включать при наличии диапазон высоты, широту, долготу, локальное время наблюдения. В соответствии с этими характеристиками предлагалась гипотеза, которая могла бы объяснить наличие необычных следов. Основным ее содержанием являются необычные детали структуры ионосферы. Для проверки этой гипотезы использовались расчеты траекторий сигналов в модельной ионосфере. Основным элементом построения модели являлась фоновая модель, с наложенной на нее моделью ионосферных неоднородностей (1.34). Это сделано с целью решения обратной задачи, при которой рассчитанная ионограмма соответствует реальной. Для этого подбор параметров неоднородностей проводится до тех пор, пока не будет достигнута максимальная схожесть модельной и экспериментальной ионограмм. Ситуация усложняется тем, что мы имеем дело с некорректной задачей, которая может иметь несколько решений. Но достаточно хорошо известные характеристики ионосферы позволяют наложить жесткие ограничения на условия задачи, что дает возможность ее однозначного решения.

3.1. Основные принципы моделирования спутниковых ионограмм

Моделирование ионограмм заключается в нахождении для всех частот рабочего диапазона ионозонда таких лучей, которые после отражения возвращаются обратно в точку излучения. Это приводит к необходимости решения граничной задачи. В общем случае трехмерно-неоднородной среды оно сводится к нахождению таких начальных значений полярного и азимутального углов волнового вектора (Δ_0, α_0) , задающих его направление в момент излучения со спутника, находящегося в точке с координатами (θ_0, φ_0) , при которых луч возвращается в точку излучения. Это приводит к системе нелинейных уравнений

$$\begin{cases} \theta(f, \Delta_0, \alpha_0) = \theta_0 \\ \varphi(f, \Delta_0, \alpha_0) = \varphi_0 \end{cases},$$

где f – рабочая частота. Для КВ-диапазона данная система может иметь несколько независимых решений, мало отличающихся друг от друга. Поэтому в общем виде нельзя гарантировать уверенное нахождение всех интересующих нас лучей.

Эту трудность можно преодолеть, используя «комплексный» 2D-метод, предполагающий независимый расчет основного и дополнительных следов в двумерном варианте, включающем структуру, ответственную непосредственно за них: для основного следа – это плоскость, направленная вдоль градиента ΔN_e , для дополнительных следов – плоскость, проходящая через спутник и перпендикулярная к поверхности равной концентрации, связанной с крупномасштабной неоднородностью. Магнитное поле учитывается приближенно с помощью частотных поправок.

Тогда на каждом этапе решается граничная задача в виде

$$D(f, \Delta_0) = 0, \quad (3.1)$$

с поиском всех корней данного уравнения методом дихотомии и секущих.

Поскольку уже несколько раз подчеркивалось, что в ионосфере нельзя найти аналитическое решение, расчет траекторий будет проводиться методом характеристик, описанным в главе 1.

Исходя из вышесказанного, достоверность и качество полученных результатов моделирования ионограммы напрямую связаны с точностью расчетов траекторий распространения радиоволн в ионосфере, которая зависит от выбора метода траекторных расчетов и соответствия заданной среды распространения (ионосферы) ее реальному состоянию.

Т.к. задача, стоящая перед нами, заключается в определении влияния неоднородных структур ионосферы на характеристики ионограмм внешнего зондирования, то при создании модели необходимо учитывать возможность наличия как крупномасштабных, так и мелкомасштабных неоднородностей. В связи с этим в общем случае трехмерно-неоднородной среды значение электронной концентрации в произвольной точке задается в виде

$$N = N_0 \cdot (1 + \Delta N_1 + \Delta N_2), \quad (3.2)$$

где N_0 соответствует регулярному профилю («фоновая ионосфера»), ΔN_1 – часть, создаваемая крупномасштабными неоднородными структурами, ΔN_2 – слагаемое, описывающее мелкомасштабные неоднородности.

Построение «фоновой ионосферы» проводится в два этапа. На первом в качестве начального приближения восстанавливаются вертикальные профили концентрации электронов в точках снятия ионограмм на всем интересующем нас участке траектории движения спутника. Искомые профили выше максимума слоя F2 определяются по данным основного следа в предположении вертикального распространения радиоволн. По его частоте отсечки определяется также значение $foF2$. Значение $hmF2$ находится в процессе

построения профиля. Более подробно такой подход описан в разделе 2.1.3. Ниже $hmF2$ профиль достраивается моделью IRI [63,74,149] с учетом значений $hmF2$ и $foF2$, полученных из ионограмм. Кроме того, модель IRI-2016 позволяет с помощью параметров $B0$ и $B1$ корректировать нижнюю часть профиля по данным основного земного следа.

Учет влияния неоднородных структур на электронную концентрацию подробно описан в разделе 1.2.3.

3.2. Обнаружение и использование удаленных наклонных отражений от Земли

Одной из открытых на ионограммах спутника “Интеросмос-19” особенностей было наличие удаленных (задержанных) отражений от Земли (УОЗ), которые, как оказалось позже, обладают большими диагностическими возможностями. Иногда наблюдаются многократные отражения, подобные тем, которые ранее были обнаружены на станции «МИР», но на высотах ниже $hmF2$ [165]. В текущем разделе, основанном на результатах [166], проводится анализ механизма формирования ЗНС по данным ИК-19. Интересно отметить, что по данным спутников Alouette и ISIS о таких следах не сообщалось.

Структуры ионосферы, формирующие ЗНС

Как показано в [166], ЗНС наблюдаются при наличии определенных структур ионосферы. На рисунке 3.3 показываются такие структуры с указанием даты, UT, LT, долготы и Kp-индекса. Видно, что общей чертой является наличие резких горизонтальных градиентов за исключением одного случая. За градиенты могут быть ответственны следующие структуры:

- 1) полярная стенка главного провала (рисунок 3.3а),
- 2) склон высокоширотного пика $foF2$ (рисунок 3.3б),
- 3) достаточно плавное падение концентрации к высоким широтам, иногда с резким уменьшением на средних широтах под влиянием магнитной бури (рисунок 3.3в),
- 4) при наличии экваториальной аномалии (ЭА) внутренний или внешний склоны ее гребня (рисунок 3.3г, рисунок 3.3д), ,
- 5) внутри ЭА, вблизи экватора (рисунок 3.3е).

Таким образом, ЗНС наблюдаются на всех широтах и в условиях резких горизонтальных градиентов.

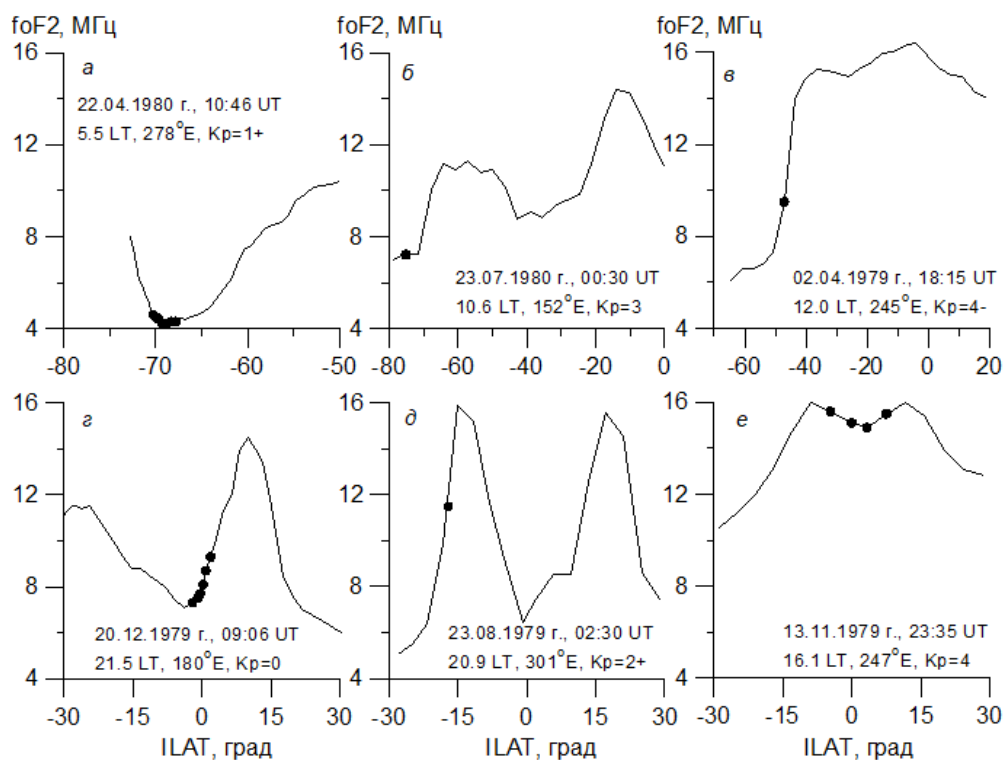


Рисунок 3.3 - Констатация связи ЗНС с характерными структурами ионосферы (их положение указано точками) вместе с датой, UT, LT, долготой и Kp

Механизм образования ЗНС и их характеристики детально исследованы в [166].

На рис.3.3 показаны наиболее характерные случаи наблюдения ЗНС, связанных с провалом, внешней стенкой ЭА и непосредственно с ЭА. Для структуры в области ГИП (рис.3.3а) на рис.3.4 приведены три ионограммы ИК-19 (22 апреля 1980). Среди наиболее характерных случаев наблюдения ЗНС имеется специфический след – своеобразный крюк. На рис. 3.4 сверху вниз по мере удаления от полярной стенки провала (ПСП) расположены ионограммы, связанные с провалом, внешней стенкой ЭА и с ЭА. У них действующие расстояние до ЗНС увеличивается от 1000-1200 км на верхней ионограмме до 1200-1400 км на нижней. Чтобы подтвердить механизм формирования ЗНС отражениями от ПСП, необходимы траекторные расчеты.

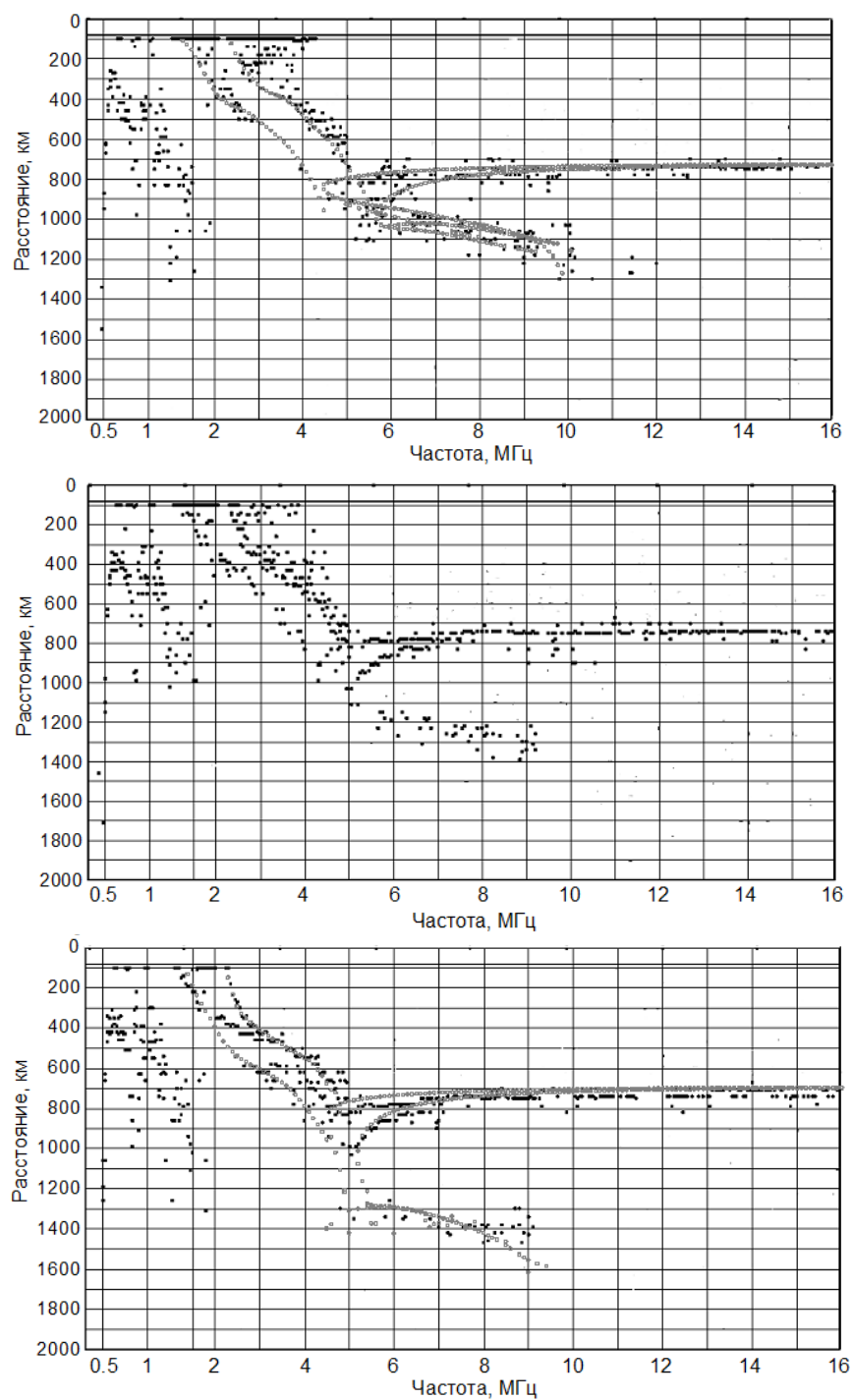


Рисунок 3.4 - Характерные случаи наблюдения ЗНС

На рисунке 3.5 приведен высотно-широтный разрез ионосферы в области ГИП, построенный в меридиональной плоскости.

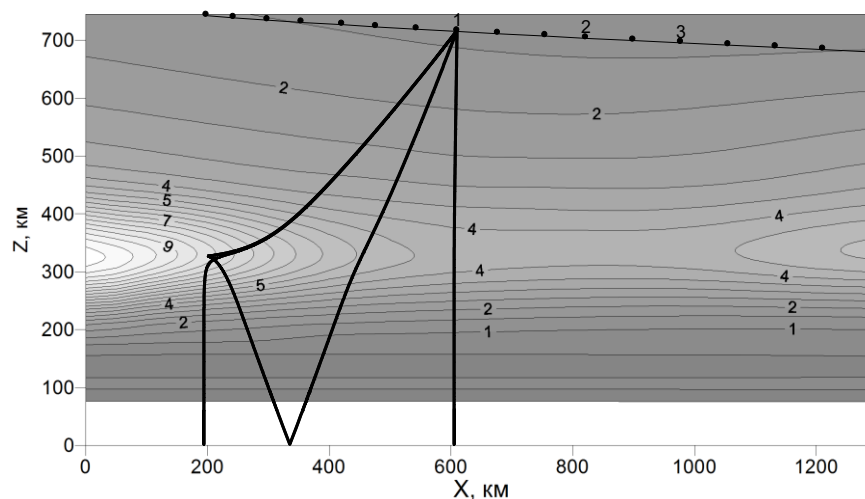


Рисунок 3.5 - Контурная карта ионосферы в области ГИП с сеансами зондирования (точки у верхней границы рисунка) и лучевыми траекториями для О-компоненты (толстые кривые) для ионограммы 1 с $f=8.6$ МГц

На широтах провала при наклонении орбиты 74° спутник пересекает довольно большой диапазон долгот, а, следовательно, и местного времени. В данном случае долготы изменялись от 268° до 285° , а местное время от 4.6 ч до 5.8 ч. На таком пространственном и временном интервале концентрация в области ПСП могла немного измениться, а ее наклон к плоскости меридиана мог составлять $1-2^\circ$. Однако при построении модельного разреза ионосферы эти изменения не учитывались, предполагалось, что с долготой ионосфера не изменяется и распространение радиоволн идет строго в меридиональной плоскости. Модельный разрез ионосферы на рисунке 3.5 построен по методике, описанной выше. Точками на орбите спутника отмечены сеансы зондирования. Кривыми на рисунке 3.5 показаны лучевые траектории на частоте 8.6 МГц для первой ионограммы, полученной наиболее близко к ПСП. Лучевые траектории приведены только для О-компоненты радиосигнала и только для земных отражений – луч справа принадлежит к основному следу, а два остальных создают ЗНС. Действующие расстояния для лучей, ответственных за ЗНС, различаются, но не намного, так что они в итоге формируют широкий земной след.

На верхней панели рисунка 3.4 представлен результат наложения модельной ионограммы, полученной с помощью траекторных расчетов, со всеми отражениями на экспериментальную ионограмму. Видно, что и отражения ионосферных О- и Х- компонент радиосигнала, и земные отражения довольно хорошо согласуются на модельной и экспериментальной ионограммах. То же самое можно сказать и относительно ионограммы 3, наиболее удаленной от ПСП. Таким образом, ЗНС действительно формируется отражениями от ПСП по схеме, приведенной на рисунке 3.5. Поэтому при удалении от нее действующие расстояния для ЗНС увеличиваются.

Выводы

Рассмотрен класс ионограмм спутника ИК-19, который был выявлен только на этом спутнике и был назван ЗНС, поскольку представляет отражения от Земли. Эксперименты показали, что такие отражения наблюдаются во всей широтной толще ионосферы от полярной зоны до экватора, но в зимнем южном полушарии и в присутствии резких горизонтальных градиентов (рисунок 3.3).

Расчеты траекторий методом характеристик были выполнены, чтобы интерпретировать эти сложные ионограммы. Построенные модельные ионограммы полностью соответствуют экспериментальным. Это соответствие подтверждает корректность метода моделирования и близость модельных профилей реальным $N(h)$ -распределениям. Расчеты показали участие двух типов наклонных лучей в образовании ЗНС. К первому типу относятся лучи, отраженные от земли под воздействием градиентов Ne в максимуме слоя F2. Ко второму типу относятся искривленные лучи, траектория которых позволяет вернуться к спутнику после отражения от Земли.

3.3. Неоднородности южного полушария

Хотя обычно максимальная частота отражения ВЧ радиосигнала от ионосферы и минимальная частота отраженных от Земли радиоволн тождественно равны критической частоте слоя F2, в некоторых случаях первая может превышать вторую в пределах 0.1-1.0 МГц, но иногда в пределах 1-2 МГц. Примеры приведены на рисунке 3.6. В статье [167] это явление названо «перехлестом». При этом следы на ионограмме достаточно четкие, поскольку отражения формируются крупномасштабной неоднородностью, имеющей размеры, во много раз превышающие длину волны, что приводит к полному внутреннему отражению. В статье [167] было дано объяснение самому простому и наиболее часто наблюдаемому случаю. Но результаты данной работы показали, что явление более сложное, т.е. наблюдаются два основных следа (ВЧ и НЧ) и самое важное, что один из них или оба могут сопровождаться ЗНС.

В работе [168] показано, что явление перехлестов связано с образованием крупномасштабных неоднородных структур в ионосфере.

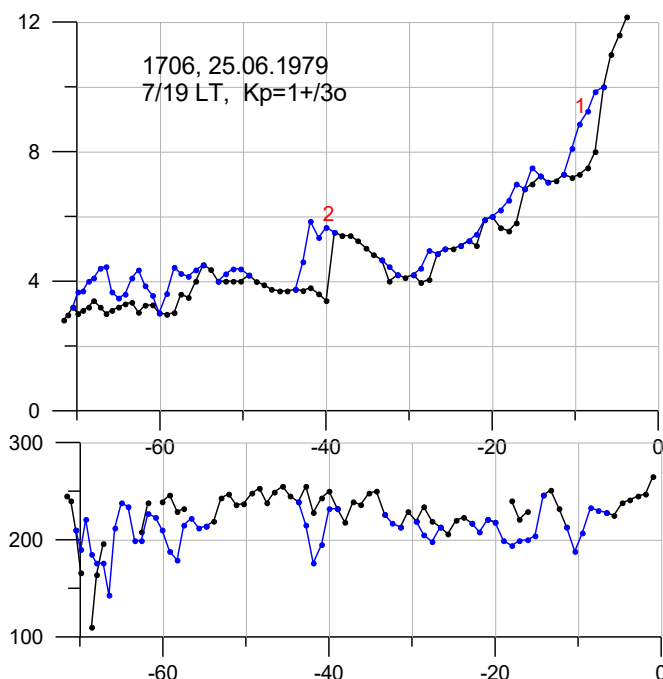


Рисунок 3.6 - Зависимость профилей foF2 (вверху) и hmF2 (внизу) от широты: сеанс 25 июня 1979 г. (17-19 LT), спокойная ионосфера южного полушария, долготы 30°W–15°E

Данные наблюдений

Восстановление широтной зависимости foF2 и hmF2 профилей проведено для сеанса 25 июня 1979 г. (рисунок 3.6). Для каждого профиля сплошная кривая относится к высокочастотному следу, а штриховая – к низкочастотному. По разнице foF2 перехлесты видны в диапазоне -7° до -70° , что говорит о неоднородности ионосферы на всех широтах. Высота максимума hmF2 оказалась очень низкой в этом сеансе ($hmF2 < 200$ км) за счет отклонения от вертикального распространения, которое связано с сильной неоднородностью ионосферы и привело к увеличению длины пути и уменьшению hmF2.

Траекторные расчеты

Случаи, отмеченные на рисунке 3.6 цифрами 1 и 2, позволяют более детально проиллюстрировать эффект перехлеста. Из рисунка 3.7 видно, что ярко выраженным является случай 1, относящийся к сеансу 17:58 UT (18:50 LT), широта 8.5°S (15.6°ILAT), долгота 13.8°E , критическая частота основного следа на ~ 2 МГц превышает частоту начала земных отражений.

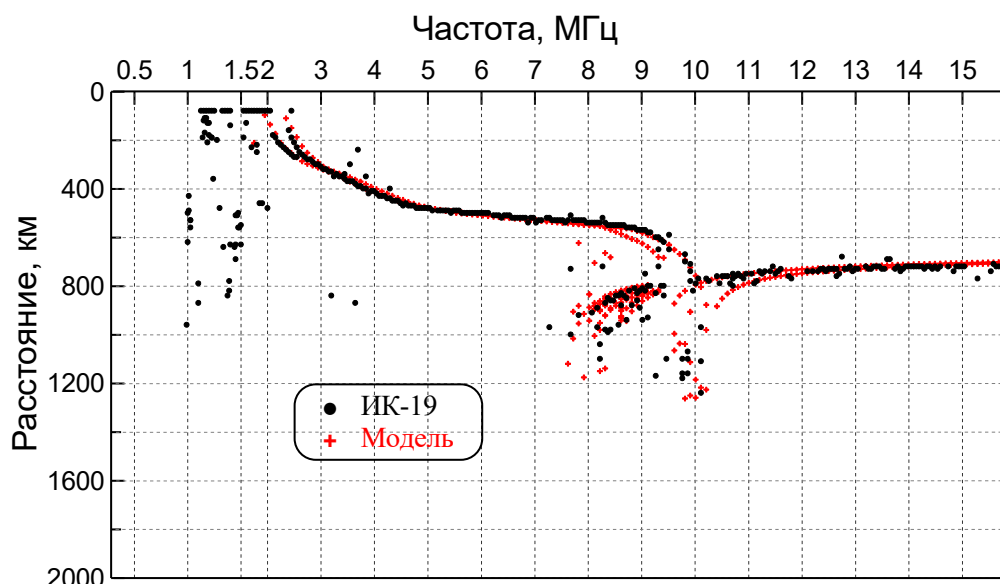


Рисунок 3.7 - Эффект перехлеста для случая 1 на рисунке 3.6

Для анализа были проведены траекторные расчеты в три этапа. На первом создавалась модель фоновой ионосферы (по данным ИК-19). На втором задавалась неоднородная структура. Этот этап самый сложный, поскольку последовательным приближением нужно добиться максимальной близости модельной ионограммы к экспериментальной. Третий этап включает траекторные расчеты для этой модели.

Результаты этих этапов иллюстрируются на рисунке 3.8: пространственное распределение плазменной частоты включает две неоднородности – крупномасштабную (слева) в виде гребня ЭА и менее мощную на широтах около 15° . В отличие от работы [167], где в модели с одной неоднородностью не был получен перехлест, земное отражение как раз и связано с введением второй неоднородности. На рисунке 3.8 также приведены траектории «Х»-лучей для частот 8.6 МГц (самый правый) и 12 МГц (второй справа).

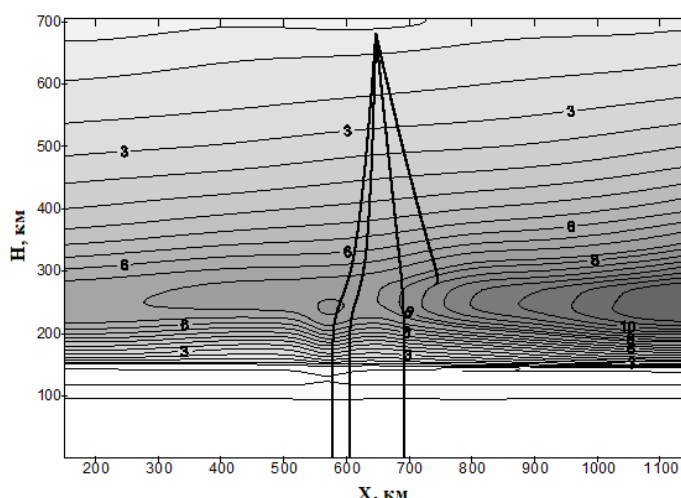


Рисунок 3.8 - К интерпретации ионограммы, приведенной на рисунке 3.7: пространственное распределение плазменной частоты и траектории лучей (частоты см. в тексте)

На рисунке 3.7 дан пример наложения модельной ионограммы на экспериментальную. Практическое совпадение основных и земных отражений свидетельствует о близости разработанной модели к реальной ионосфере,

Рисунок 3.9 дает пример наблюдения нескольких неоднородностей в сеансе 10 августа 1980 г. 11 LT в виде широтной зависимости f_oF2 . В начале графика наблюдаются три крупномасштабные неоднородности в южном зимнем полушарии с размерами по широте 400–500 км. Все с перехлестами, наиболее сильными вблизи центра каждой неоднородности.

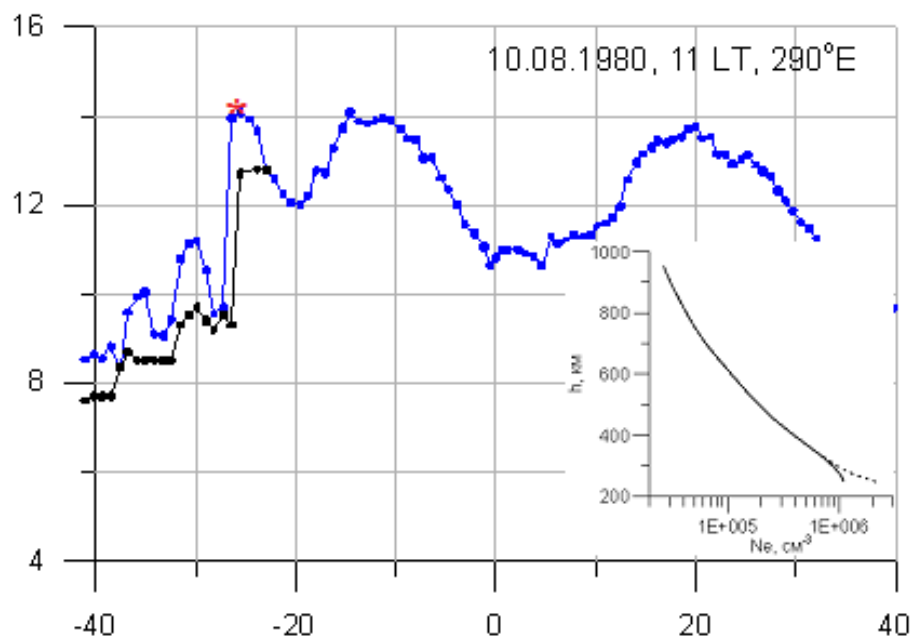


Рисунок 3.9 - Зависимость f_oF2 от широты для сеанса 10 августа 1980 г. на меридиане 290°E.

Рисунок 3.10 показывает ионограмму для случая особенно сильного различия критических частот двух основных следов: разница превышает 4.5 МГц.

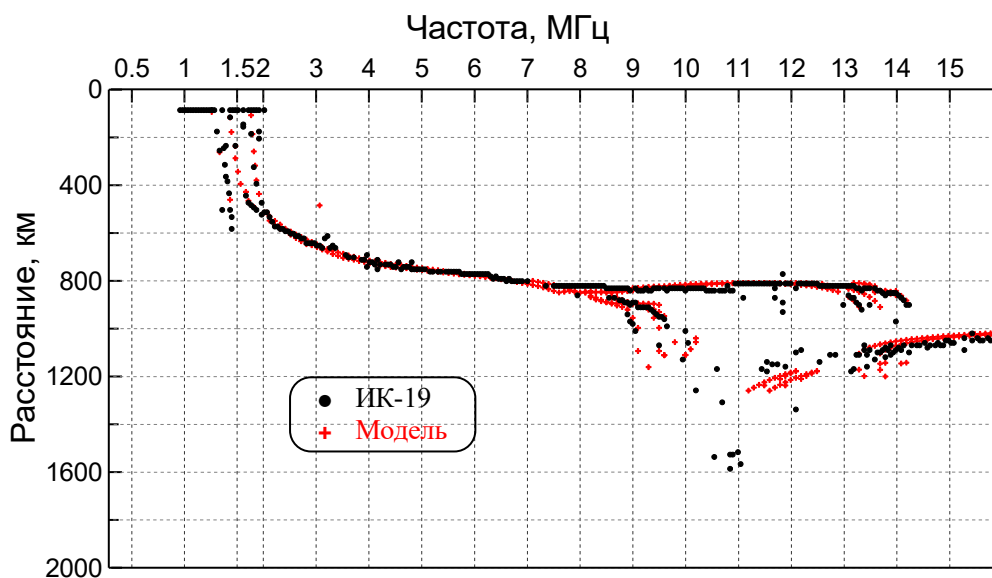


Рисунок 3.10 - Случай ионограммы для максимума самой интенсивной неоднородности (звездочка на рисунке 3.9).

К особенностям ионограммы рисунка 3.10, связанной с самой интенсивной неоднородностью, можно отнести почти горизонтальный след, слияние основных следов О- и Х-компонент в середине частотного диапазона, появление крюков после вертикального загиба к своей частоте на конце диапазона. К тому же, наблюдаются не два, а три крюка, различающиеся (второй и третий справа на $f_h/2$, т.е. О- и Х-лучи отразились от неоднородности, у которой концентрация в максимуме превышает фоновую ~ 2.3 раза. Рисунок 3.11 подобен рисунку 3.8 и показывает интенсивную неоднородность справа на гребне ЭА на широтах $20\text{--}26^\circ \text{S}$ и слабую (слева). Частота второго «Х»-луча справа равна 13.4 МГц, а для самого правого - 14.2 МГц. Именно он отражается от слабой неоднородности. Третий справа «О» луч имеет частоту 13.4 МГц. Два луча Х и О с частотой 9.4 МГц отражаются от менее интенсивной неоднородности, образуя более низкочастотный след. Крайний слева – это О-луч с отражением от земли на частоте 10.4 МГц.

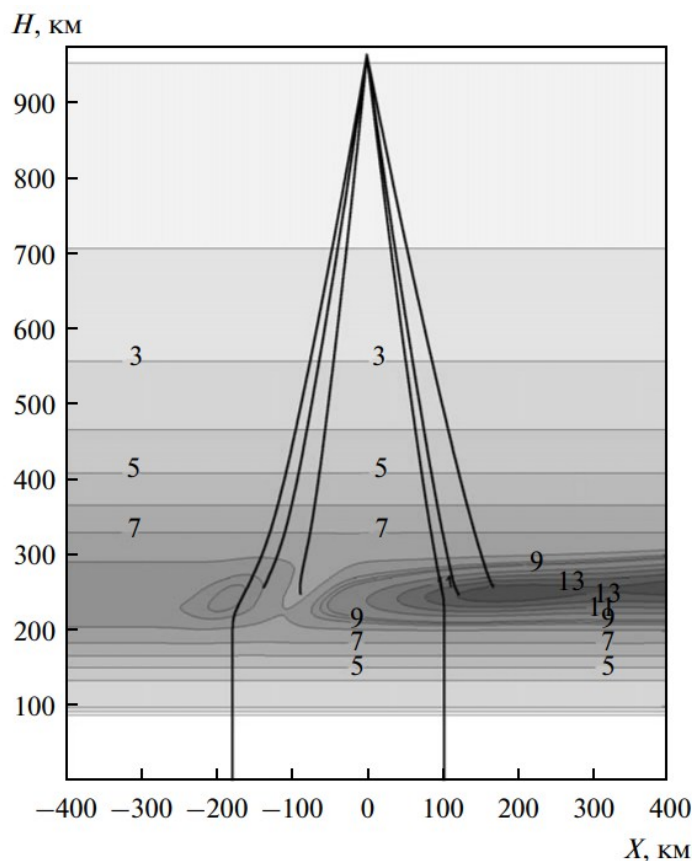


Рисунок 3.11 - Модель ионосферы с двумя неоднородностями и траектории лучей, приводящих к ионограмме на рис.3.9 с частотами, описанными в тексте

Обсуждение и выводы

Приведенные результаты в виде ионограмм ВнЗ с перехлестом показывают принципиальную асимметрию полушарий, поскольку в северном полушарии такие

ионограммы не наблюдались. Для крупномасштабных неоднородностей, которые являются причиной перехлестов, удалось получить размеры, которые составили 200-800 км по широте и до 1000 км по долготе, с концентрацией в максимуме, иногда в ~ 2.5 раза превышающей фоновую. Преимущественное время наблюдения перехлестов относится к периоду от 7–8 LT до 18–19 LT, особенно на долготах 240–330° Южной Америки (40–70°S). ИК-19 обнаружил в этой области низкие значения $foF2$ и $hmF2$ (220–250 км). Такие низкие значения $hmF2$ благоприятствуют образованию неоднородностей, в том числе из-за особенностей термосферы. Обнаружено, что образование неоднородностей не сильно связано с геомагнитной активностью, хотя можно было бы ожидать определенного влияния Бразильской магнитной аномалии (см., например, [169]).

3.4. Особенности ионограмм в области главного ионосферного провала

Ионограммы спутника показали, что крупномасштабные неоднородности часто приводят к дополнительным следам, скорее всего из-за невертикального распространения радиоволн. Для подтверждения этого предположения ниже анализируется серия последовательных ионограмм с дополнительными следами для сеанса 26 ноября 1980 г. с целью моделирования такой структуры ионосферы, которая привела бы к формированию этих следов (по результатам статьи [170]).

Данные наблюдений

Последовательность ионограмм, отмеченных цифрами, показывает динамику изменений ионосферы. Ионограмма 1: вершина экваториальной стенки провала (ЭСП), первые слабые дополнительные следы. Ионограмма 2: спутник двигался вдоль ЭСП, что привело к интенсификации и появлению двух лучей. Ионограмма 3: все следы становятся все более диффузными, слияние двух следов. Ионограмма 4: минимум провала, один сильно диффузный след, но $foF2$ и $fxF2$ определяются. Ионограмма 5: полярная стенка, супердиффузная ионограмма.

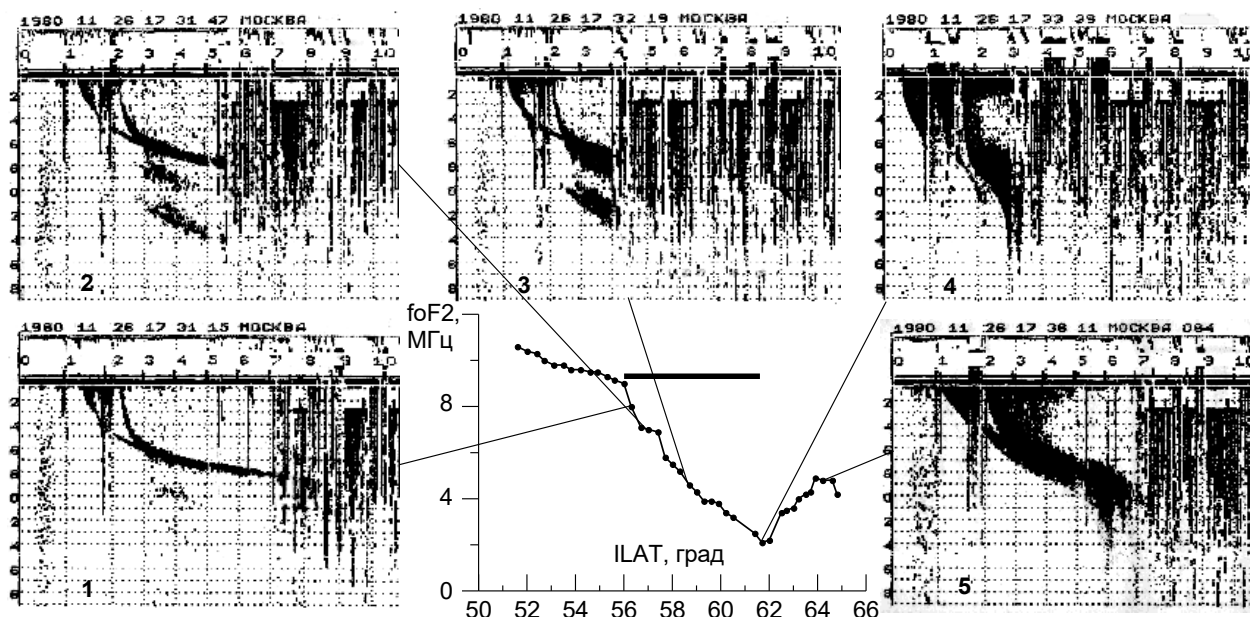


Рисунок 3.12 - Характерные ионограммы спутника ИК-19, связанные с распространением волн в ситуациях с различным состоянием провала (ось Y – действующее расстояние в сотнях километров, ось X – значения зондирующей частоты в МГц верхней части графиков). В центре внизу приведен широтный разрез $foF2$, где толстым отрезком показана область наблюдения дополнительных следов

Модель ионосферы

Поскольку в данном разделе рассматривается влияние провала на вид ионограмм, необходимо построить модель в области провала, что сопряжено с большими трудностями, как видно из рисунка 3.12: 1) сильное F-рассеяние, 2) наличие шумов ниже критической частоты, 3) невертикальное распространение радиоволн. Это видно на большинстве ионограмм, например, на ионограмме 4, когда частоты определяются, несмотря на сильное рассеяние. На ионограмме 2 видны шумы ниже $foF2$. Но обработка зашумленных ионограмм позволила накопить опыт для расчета $N(h)$ -профилей в такой ситуации. Использование интерполяции сплайнами позволило построить высотно-широтный разрез внешней ионосферы и скорректировать его с учетом отражений от ЭСП. Для нижней части использовалась модель IRI. Полный разрез ионосферы в области ГИП показан на рисунке 3.13.

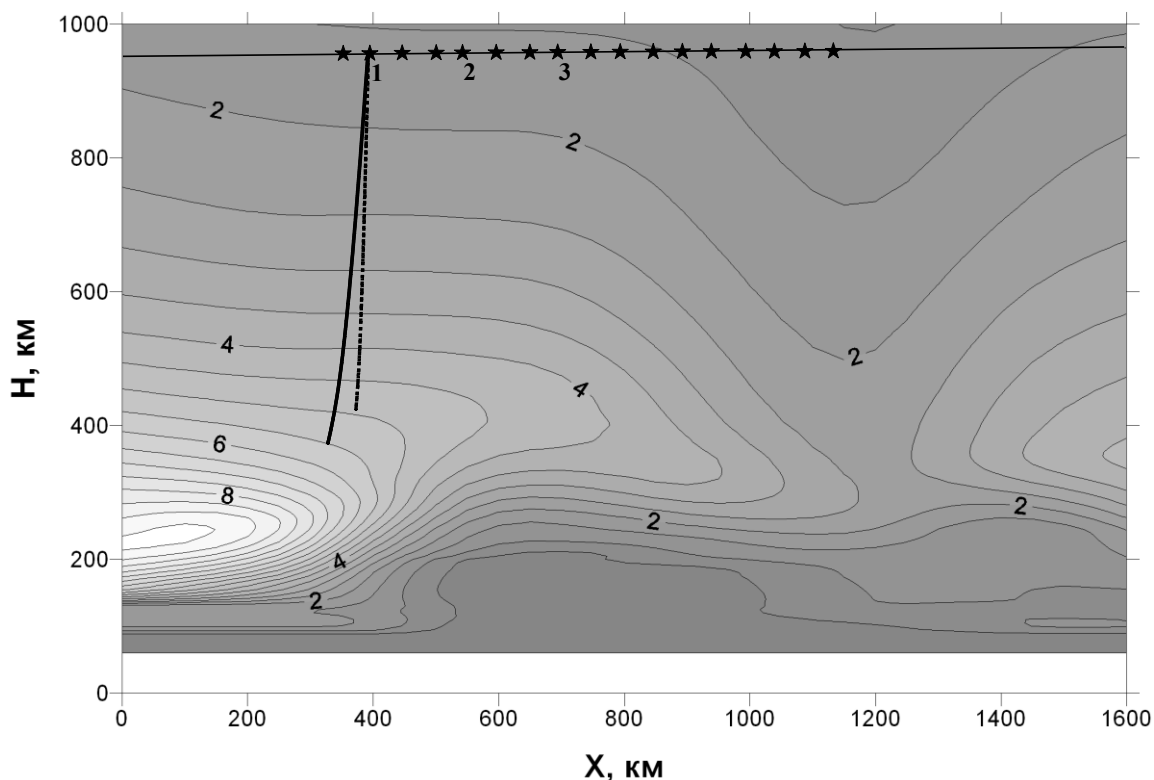


Рисунок 3.13 - Вариации плазменной частоты вдоль орбиты спутника с отмеченными на ней звездочками местами регистрации дополнительных следов (вверху). Лучевая траектория для обыкновенной волны показана сплошной кривой, для необыкновенной волны – пунктирной (частота зондирования 5.5 МГц). Изолинии приведены в МГц

В [170] подробно описаны 16 критериев наличия дополнительных следов, связанных с крупномасштабной неоднородностью, ее расположением и параметрами. Поскольку этот набор критериев определяет единственность решения, должна существовать структура, удовлетворяющая этому набору. Поиск такой структуры проводился следующим образом. В качестве таких структур рассматривались: 1) неоднородности, вытянутые вдоль магнитного поля, 2) «канавы» в электронной концентрации по обеим сторонам от спутника, 3) ямы и пики электронной концентрации, вытянутые вдоль минимума провала и т.д. Оказалось, что удовлетворить всем критериям может единственная структура, а именно, вытянутая вдоль меридиана крупномасштабная неоднородность на ЭСП. На схематическом рисунке 3.14 эта неоднородность расположена в горизонтальной плоскости. Высота спутника ~950 км, неоднородность занимает большой диапазон высот, который позволяет получить действующие расстояния для дополнительных следов.

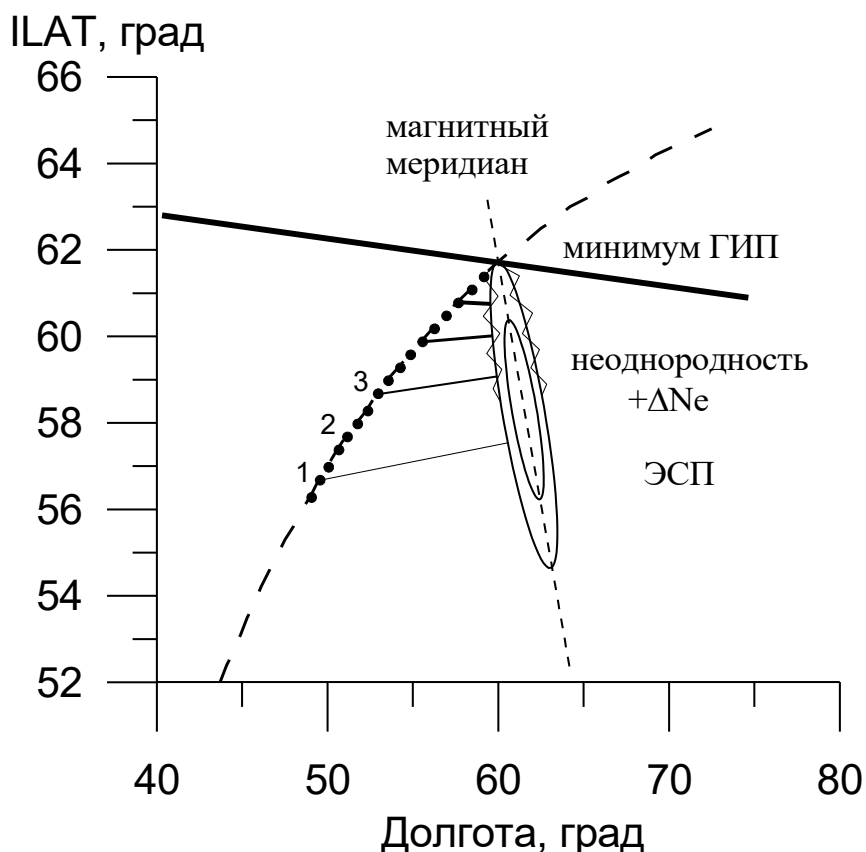


Рисунок 3.14 - Иллюстрация неоднородности, создающей дополнительные следы

Рисунок 3.14 имеет важное значение для объяснения главных особенностей эксперимента на ИК-19, потому что позволяет показать, что за формирование F-рассеяния могут быть ответственны именно мелкомасштабные неоднородности в минимуме ГИП и на его полярной стенке. Можно выделить следующие особенности:

- 1) рост интенсивности отраженных сигналов,
- 2) уменьшение действующего расстояния первого дополнительного следа по мере приближения к неоднородности,
- 3) рост интенсивности F-рассеяния при приближении к минимуму ГИП,
- 4) длительный период наблюдения дополнительных следов,
- 5) слияние всех следов в один в минимуме ГИП.

Качественная картина эксперимента представлена на рисунке 3.14. Рисунок 3.15 дает количественные характеристики неоднородности в виде двух разрезов, перпендикулярных к стенке неоднородности и относящихся к ионограммам 1 и 3 на рисунке 3.13. Оценки дают отклонение $\delta f_o F2 \sim 30\%$ ($\delta Ne \sim 70\%$) в максимуме неоднородности. Для симметричной неоднородности полуширину можно оценить в 50-70 км. Длину неоднородности можно оценить в несколько сотен километров. Ее наклон к спутнику обеспечивает возврат лучей к нему. Из дополнительных следов можно определить положение неоднородности выше максимума слоя F2 и до высоты ~ 800 км.

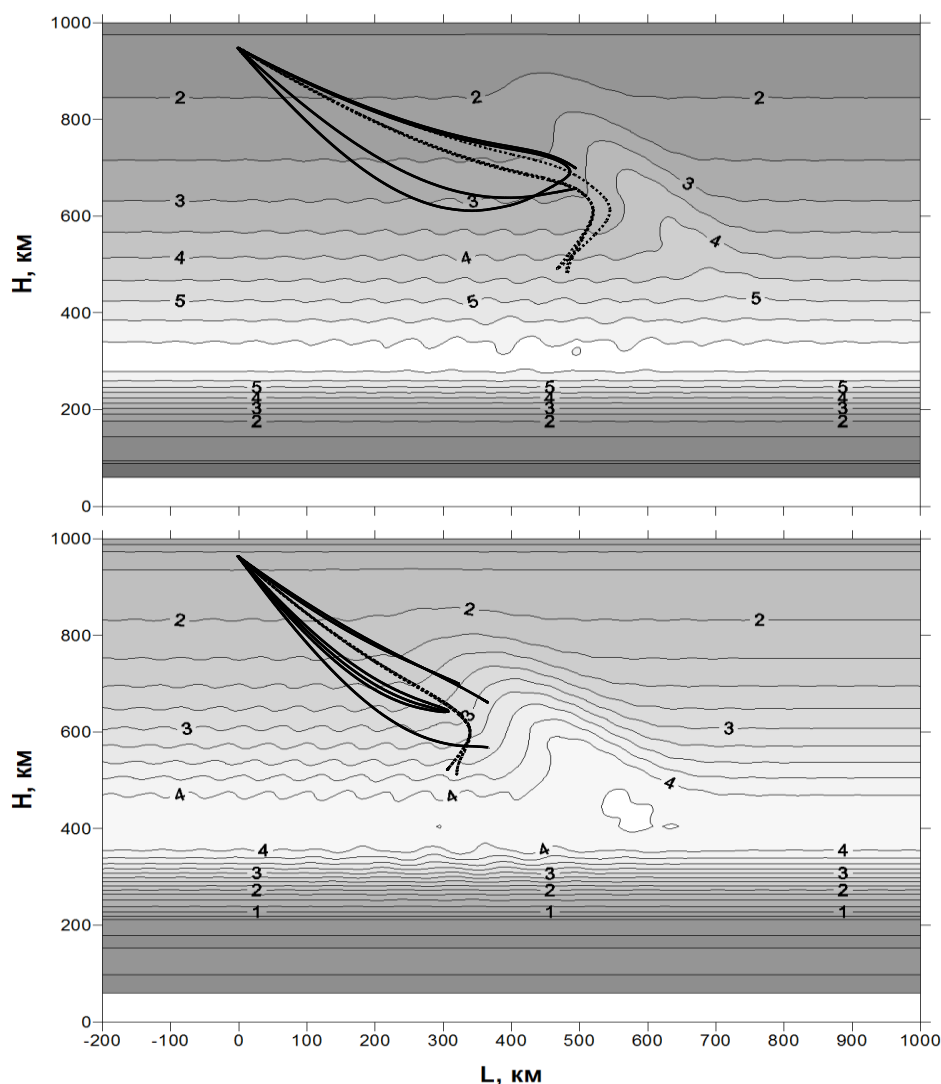


Рисунок 3.15 - Геометрия эксперимента для воспроизведения ионограмм рисунка 3.14 (1 – верхняя панель, 3 – нижняя панель): сплошными линиями показаны лучи первого дополнительного следа, пунктирными линиями – лучи второго дополнительного следа

Траекторные расчеты и сравнение с экспериментом

Рисунок 3.13 указывает на связь основного и дополнительных следов с независимыми структурами. – ГИП и крупномасштабная неоднородность, расположенная в стороне.

Рисунок 3.15 иллюстрирует механизм образования дополнительных следов. Лучи, отраженные от самой стенки неоднородности (сплошные линии), образуют первый след с действующей дальностью, напрямую связанной с расстоянием от спутника до неоднородности, что позволяет определить положение неоднородности. Второй (нижний) след сформирован лучами, лишь искривленными под влиянием неоднородности. Их отражение происходит от «основной» ионосферы (пунктирные линии). При такой геометрии время распространения этих лучей гораздо больше и слабо зависит от изменения расстояния до неоднородности, что и наблюдается на ионограммах. Тот факт, что лучи, формирующие оба следа, расположены компактно и составляют один объемный пучок, приводит к

отмеченному выше противоречию в методике решения задачи.

Стоит отметить изменение вида ионограмм при приближении спутника к минимуму ГИП. Вдали от него в присутствии даже одной неоднородности следы узкие и четкие. Затем появляются мелкомасштабные неоднородности, вызывающие F-рассеяние, и признаки диффузности на ионограммах. При дальнейшем движении диффузность увеличивается, поскольку растет мощность неоднородностей, генерируемых в провале, приводя к уширению (расплыванию) следов, что совпадает с экспериментальными данными. Модель учитывает это введением волновых возмущений Ne различной амплитуды.

Стоит подчеркнуть, что соответствие между экспериментальными и рассчитанными ионограммами получено при использовании «комплексного» 2D-метода моделирования. Это соответствие видно из рисунка 3.16, на котором отдельно приведены экспериментальная и рассчитанная ионограммы 2. Оно относится как к частотам, так и к действующим расстояниям. Земной след отсутствует из-за аналоговой обработки.

Выводы

Проведен анализ ионограмм внешнего зондирования спутника ИК-19, который выявил такие особенности, как наличие дополнительных следов в области ГИП. Показано, что их причиной является сочетание двух факторов: наличие провала и крупномасштабной неоднородности. При задании модели неоднородности были учтены характеристики дополнительных следов, которые относились к 1) положению неоднородности на экваториальной стенке провала, вдоль геомагнитного меридиана она была вытянута на сотни километров, а по высоте составила 350 км, 2) отклонение $\delta f_oF2 \sim 30\%$ в максимуме неоднородности. Была высказана гипотеза о возможном влиянии на формирование неоднородности периода геомагнитного возмущения, с которым могут быть связаны такие факторы, как электрическое поле, высыпание частиц и нейтральный ветер.

Численное моделирование основных и дополнительных следов ионограмм методом характеристик с помощью «комплексного» 2D-метода показало хорошее соответствие с экспериментальными ионограммами.

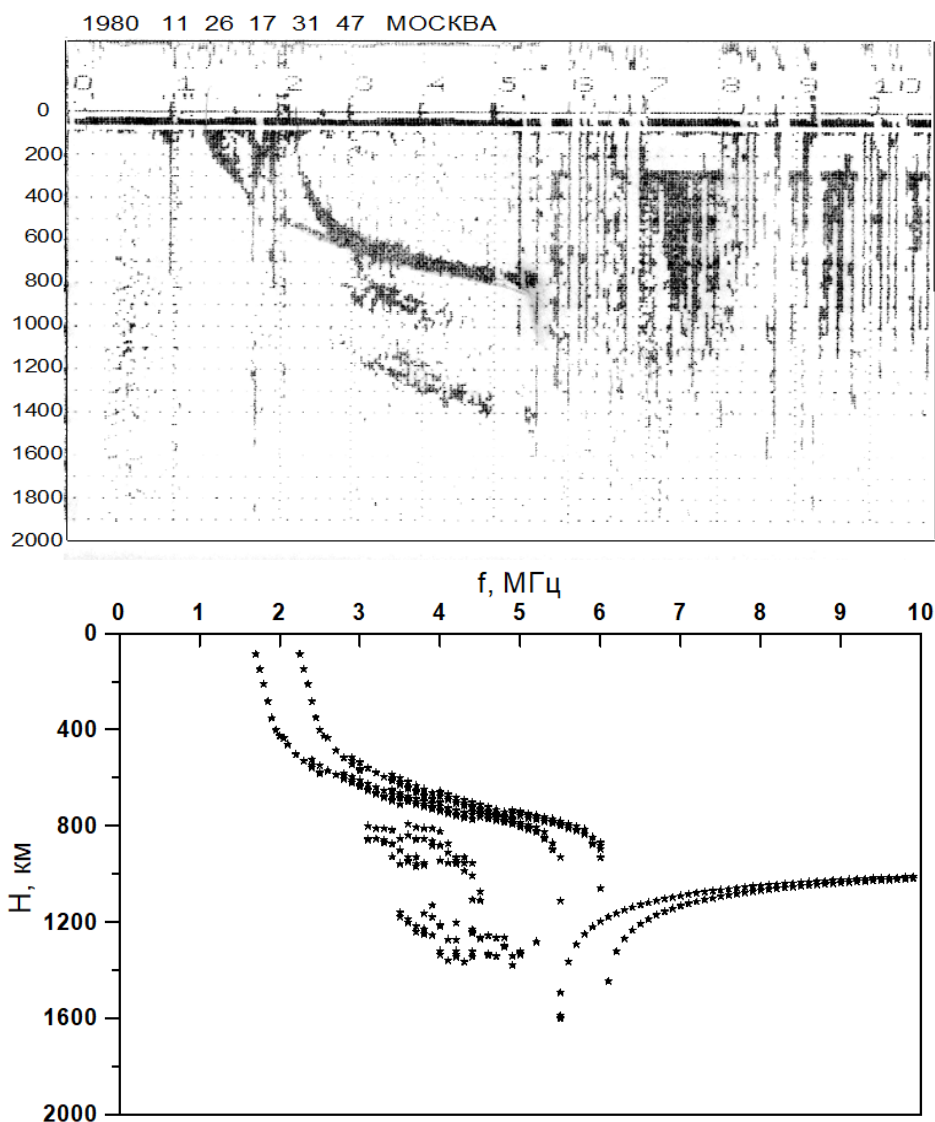


Рисунок 3.16 - Сравнение экспериментальной (вверху) и рассчитанной (внизу) ионограмм 2 для сеанса в 17:31:47 UT

3.5. Множественные следы в диапазоне 7–10 МГц

В диапазоне частот 7–10 МГц спутник регистрировал уникальные ионограммы, явно связанные с рассеянными отражениями. Было рассмотрено несколько вариантов для объяснения: 1) шумы радиостанций, 2) аппаратные эффекты, 3) множественные структурированные следы. Однако ни одна из этих причин не подошла. Оставалась только одна возможность – экспериментально исследовать характеристики рассеянных отражений и множественных следов в диапазоне 7–10 МГц и попытаться смоделировать неоднородности, которые помогли бы объяснить наблюдаемые следы. Для этого выполнен цикл траекторных расчетов. Приведенные в этом разделе результаты основаны на работе [171].

В качестве первого примера взяли ионограмму, представленную на рисунке 3.17,

полученную 13 ноября 1979 г. в южном полушарии. Четко видно диффузное облако на частотах 7–10.5 МГц с верхним краем в виде отдельного следа. Одновременное присутствие диффузных и структурированных отражений указывает на присутствие мелкомасштабных неоднородностей.

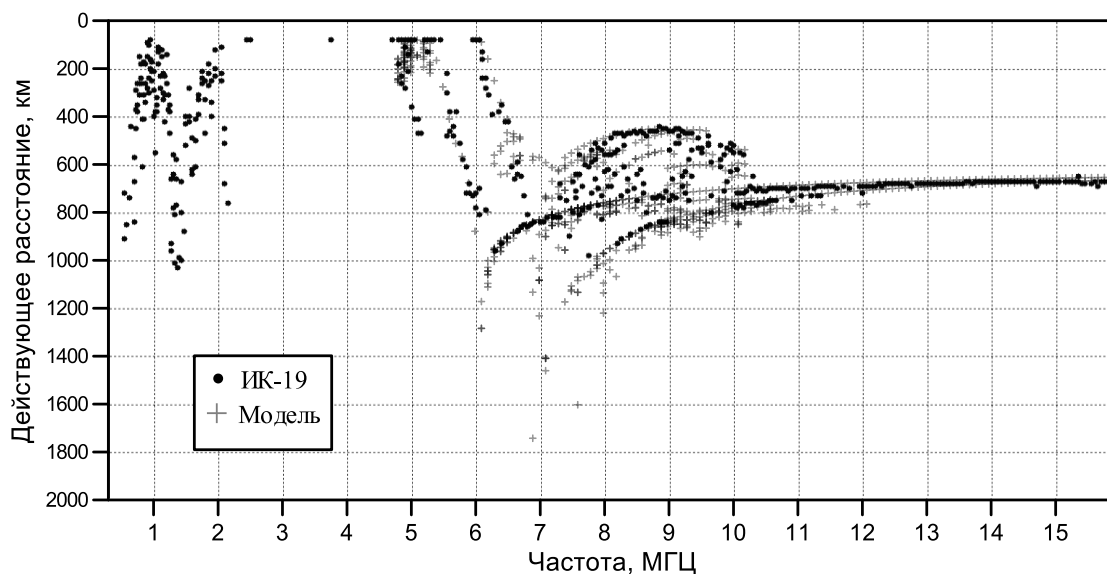


Рисунок 3.17 - Пример уникальной ионограммы: сеанс 13.11.1979 г. 21:36 UT (12:00 LT), долгота 216°E, широта 72.2°S (южное полушарие), высота 637 км. Точки – экспериментальная ионограмма, крестики – модельная

Траекторные расчеты

Таким образом, задачей является построение модельной ионограммы, максимально приближенной к экспериментальной (рисунок 3.17). Такая близость позволит определить характеристики неоднородностей, ответственных за многочисленные следы. Для расчетов использовался двумерный случай с лучами, спутниками и неоднородностью в одной плоскости. Задачей было построение следов для сигналов, отраженных от: 1) регулярной ионосферы, 2) «главной» неоднородности, 3) мелкомасштабных неоднородностей. Соответствующая модель, созданная для решения этой задачи, показана на рисунке 3.18, а на рисунке 3.17 наложена модельная ионограмма, чтобы облегчить сравнение. Она приводит к нужным деталям ионограммы, потому что фоновая модель является довольно точной, верхняя граница диффузной структуры сформирована на частотах 7–10.5 МГц, а мелкомасштабные неоднородности различных размеров приводят к множественным отражениям. Также для примера показаны лучевые траектории на частоте 8 МГц, включающие лучи с отражением от земли и лучи, создающие облако.

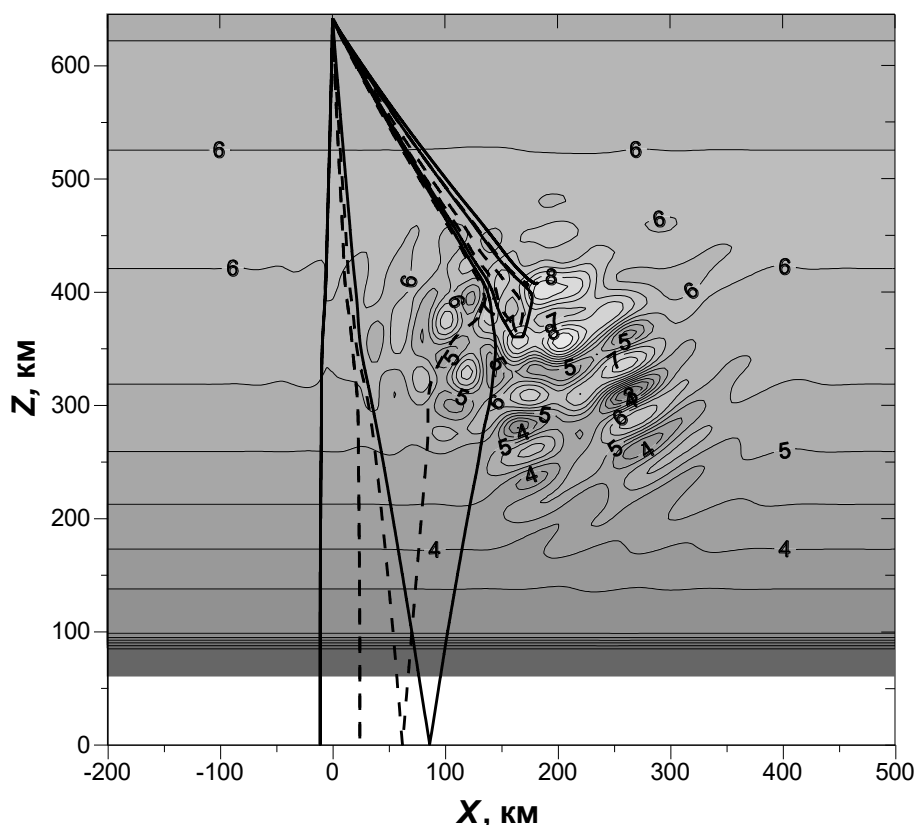


Рисунок 3.18 - Модель пространственного распределения плазменной частоты, разработанная для интерпретации эксперимента, который имел место 13 ноября 1979 г. Даны примеры лучей с частотой 8 МГц, определяющих точки ионограммы («О»-лучи – сплошные линии, «Х»-лучи – штриховые)

На рисунке 3.19 показана еще более необычная ионограмма, измеренная в сеансе 11 ноября 1979 г. 04:21 UT, широта 63.8°S. Четко выраженные множественные следы захватывают диапазон от ~8,5 МГц до ~11,5 МГц, т.е. нужный диапазон. Земные следы определяются фоновой ионосферой, в отличие от них отражения от крупномасштабных неоднородностей формируют более высокочастотные следы, в данном случае от трех.

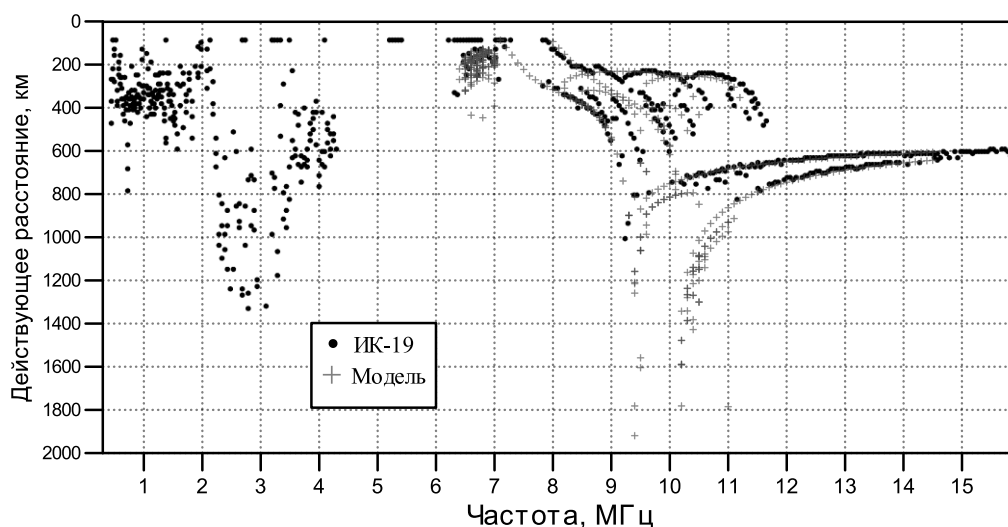


Рисунок 3.19 - Еще более уникальная ионограмма: детали сеанса приводятся в тексте. Экспериментальная ионограмма показана точками, модельная – крестиками

Интересно было смоделировать эту ионограмму. Рисунок 3.20 показывает модель, на основе которой построена ионограмма рисунка 3.19. Результаты аналогичны предыдущему случаю: основные О- и Х- следы на больших частотах очень близки к экспериментальным, дополнительные следы, связанные с неоднородностью справа, тоже близки к экспериментальным. Вторая (слева) более слабая неоднородность привела к дополнительным следам с меньшими частотами.

Таким образом, в данном случае получены следующие характеристики неоднородностей: расположение выше $h_m F_2$, размеры порядка 150–200 км по высоте и десятки километров по широте, превышение плотности составило ~ 1.4 раза по сравнению с фоном.

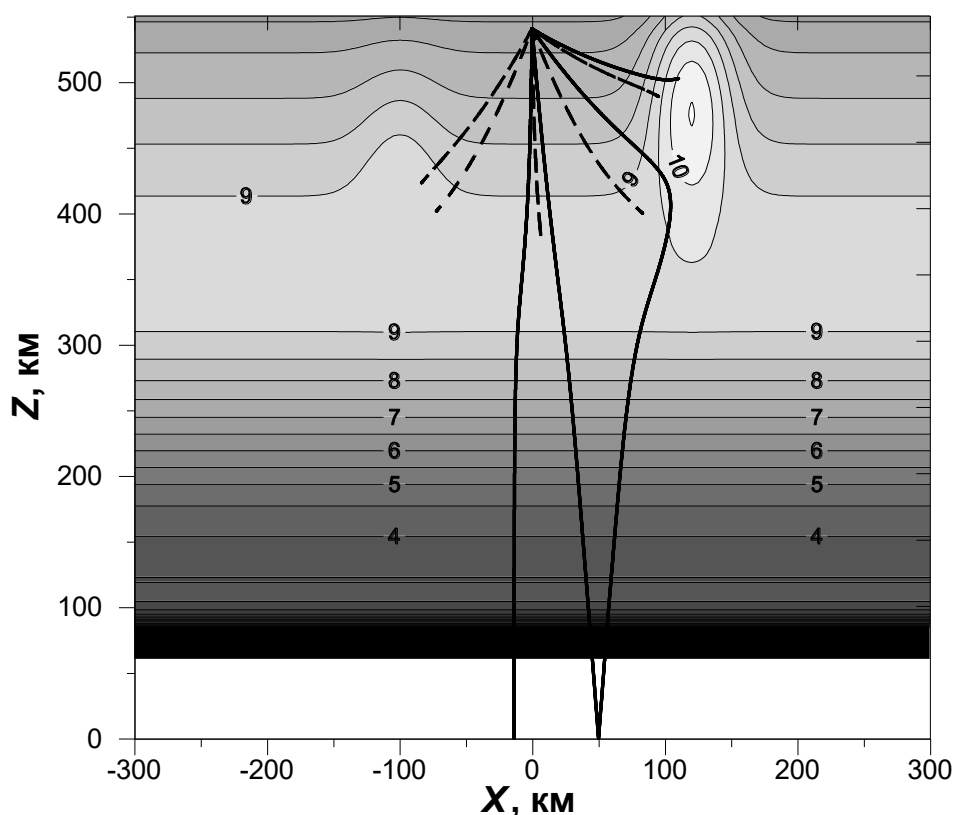


Рисунок 3.20 - Модель пространственного распределения плазменной частоты, разработанная для интерпретации эксперимента, который имел место 11 ноября 1979 г. Даны примеры лучей, формирующих ионограммы: сплошные кривые – О-компонента, штриховые – Х-компонента. Частота зондирования 8 МГц. Изолинии плазменной частоты указаны в МГц

Обсуждение и выводы

Показано, что существует выделенный диапазон частот $\sim 7\text{--}11$ МГц, в котором наблюдаются множественные следы отражений. Такая избирательность может быть связана с наибольшей чувствительностью системы спутник-антенна-передатчик-приемник

ионозонда или определенными значениями плотности плазменных образований, например, $(6-12) \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, но этот вывод нуждается в дополнительном подтверждении. Но в любом случае несомненно, что за F-рассеяние ответственны неоднородности различных масштабов, которые по широте делятся на высокоширотные и экваториальные, а по высоте находятся в верхней ионосфере от высоты максимума слоя до высоты спутника 1000 км. Получено, что F-рассеяние в этих областях не зависит от уровня магнитной активности.

3.6. Моделирование неоднородной структуры низкоширотной ионосферы

Массив данных ИК-19 составляет около 500000 ионограмм и содержит огромное множество необычных ионограмм. Из множества аналоговых ионограмм удалось выбрать очень необычную, связанную, как оказалось, с гребнем ЭА: 4 диффузных облака были похожи на «жемчужины», нанизанные на основной след. В этом разделе дается интерпретация такой структуры со ссылкой на работу [172].

Данные наблюдений

Необычное событие началось 9 апреля 1981 г. с появления слабого рассеянного облака на высокочастотном участке основного следа. Сначала оно было замаскировано шумами наземных станций ($f < f_{of2}$), но начала формироваться следующая похожая структура и остальные. Рисунок 3.21 показывает две последовательные ионограммы в процессе развития. На нижней ионограмме процесс развития закончился. Интенсивность увеличивалась при движении к экватору, но данные спутника оборвались на широте 19.6° ПЛАТ. Подобные структуры наблюдались и на цифровых ионограммах, но с более низким качеством.

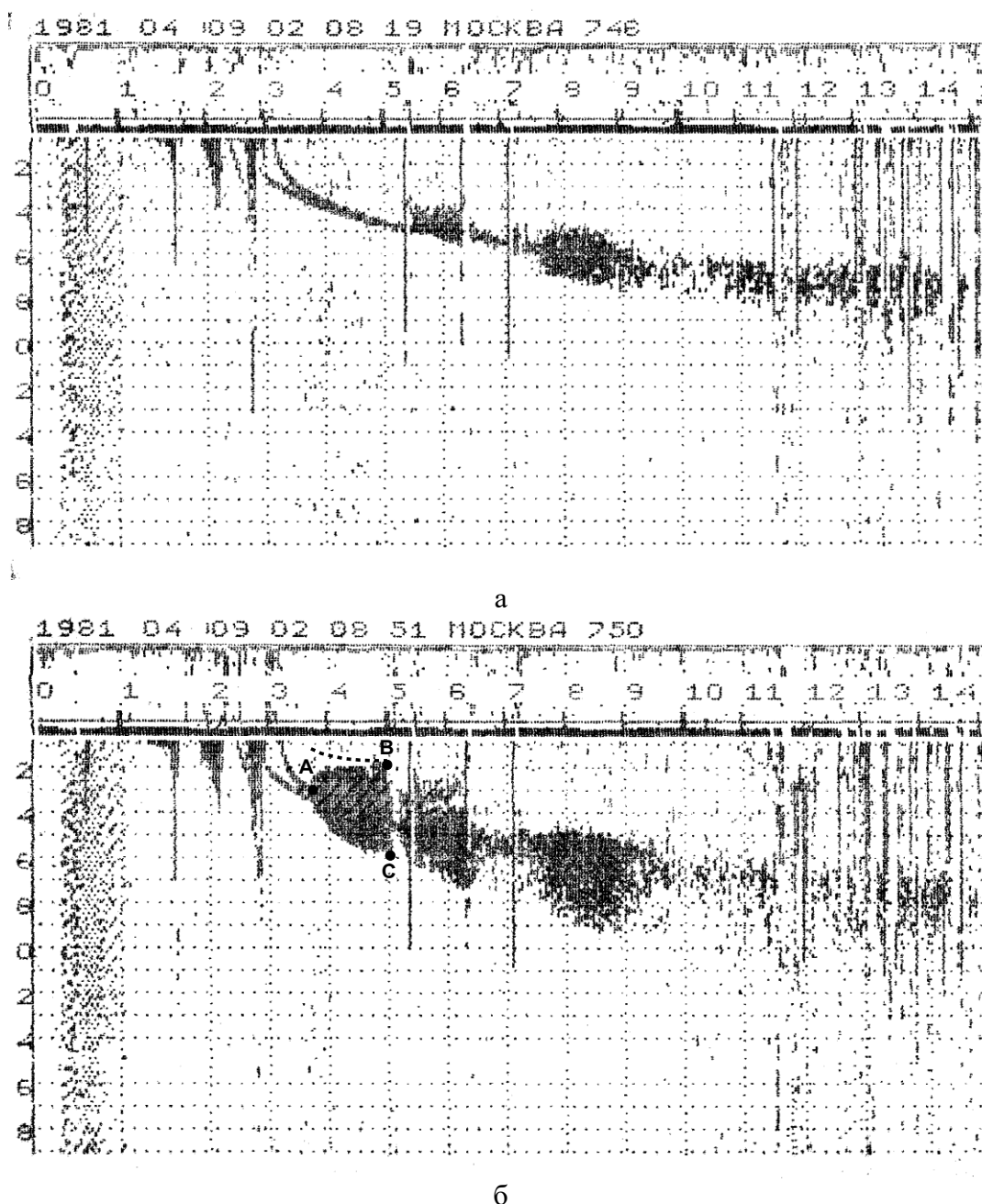


Рисунок 3.21 - Необычные ионограммы, наблюдавшиеся в пункте Москва в течение нескольких сеансов 9 апреля 1981 г: (а) 02:08:19 UT, (б) 02:08:51 UT на долготах 25-30° (LT 1.2-1.4 ч)

Рисунок 3.22 показывает зависимость f_oF_2 от широты для всего витка и двух сеансов для сравнения. Точки представляют основной О-след, кружки - минимальные частоты шумов наземных станций. Это пример проникновения шумов на спутник на частотах ниже f_oF_2 . Из-за маскировки критической частоты шумами ее значение принято равным 15 МГц, что можно считать минимальным значением. Следующий виток 10 апреля 1981 (штриховая кривая) полностью повторяет виток 9 апреля 1981 г., но оборвался раньше. Тем не менее, можно сделать вывод, что такое явление наблюдается на гребне ЭА и не является уникальным. Возможность полностью воспроизвести структуру ЭА показана по данным зондирования в цифровом режиме в сеансе 3 апреля 1980 г. Результаты показаны на рисунке

3.22 пунктирной кривой. Четко видна структура северного гребня ЭА и наличие исследуемой структуры на вершине и отчасти на внешнем склоне гребня ЭА, который очень хорошо развит, несмотря на позднее время (~01 LT).

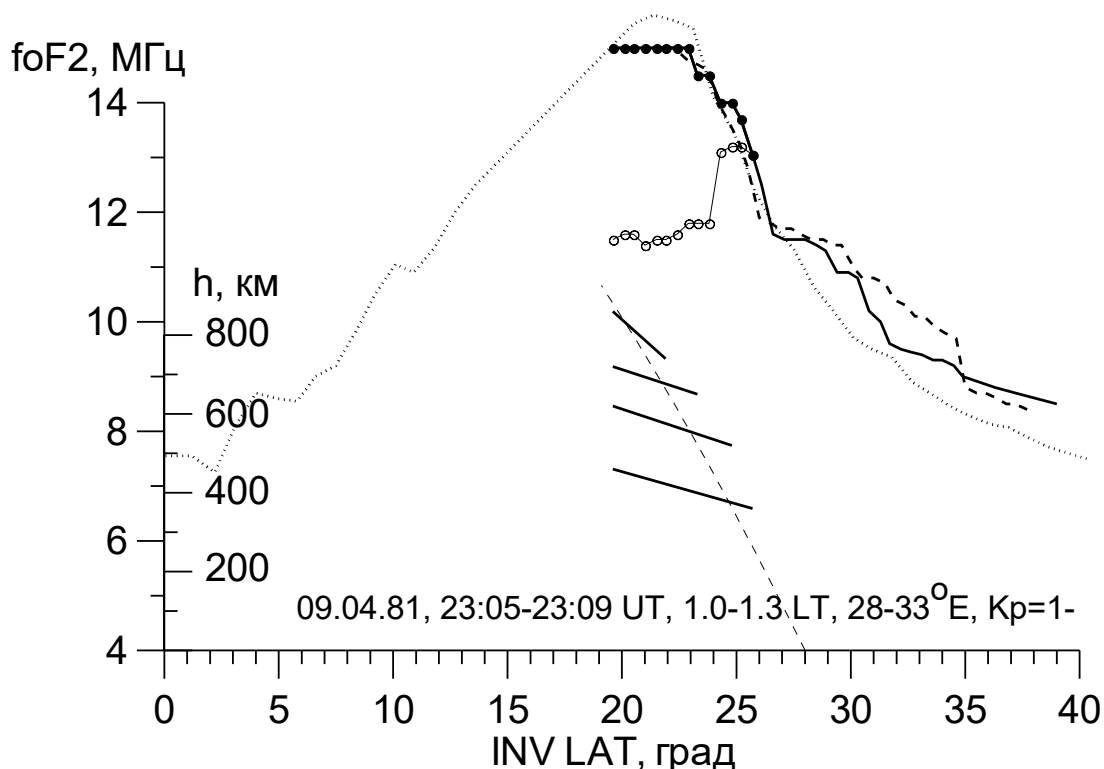


Рисунок 3.22 - Интерпретация ионограмм с необычными следами: зависимость $foF2$ от широты для трех сеансов: 1) сплошная линия 9 апреля 1981 г. 2) штриховая линия 10 апреля 1981 г., 3) пунктирная линия 3 апреля 1980 г.

Интересно более подробно рассмотреть структуру на рисунке 3.21б, чтобы проверить связь с неоднородной структурой ионосферы. По расположению жемчужин на разных высотах предположили наличие множества неоднородностей на разных расстояниях: на рисунке 3.21 в виде 4 слоев. На рисунке 3.21 выделены реперные точки А, В, С. А-точка, в которой начинается отражение от ближайшей неоднородности, В-точка, соответствующая максимуму неоднородности, в которой отражение заканчивается. Штриховой линией показаны истинные расстояния. Разность высот между А и В определяет толщину неоднородности в несколько десятков километров (рисунок 3.22). Разность частот между А и В определяет мощность неоднородности. В данном случае это – $\delta Ne = (N_{max} - N_o)/N_o \sim 80\%$ для первой сверху жемчужины, 55% – для второй, 95% – для третьей, не менее 100% – для четвертой. Можно констатировать, что это очень мощная неоднородность.

Модель неоднородной ионосферы и траекторные расчеты

Представив модель неоднородной ионосферы суммой фоновой и неоднородной частей, рассмотрим отдельно задание каждой части: для фоновой ионосферы можно использовать

данные ионограмм ИК-19, по основному следу которых восстанавливается профиль электронной концентрации в точках зондирования в вертикальном приближении. Поскольку соседние витки ИК-19 не сильно отличаются по величине концентрации, в первом приближении можно пренебречь долготными градиентами и использовать в расчетах двумерное пространственное распределение ионизации $N_0(r, \varphi)$. Непрерывность плазменной частоты и ее производных, необходимая для расчета траекторий обеспечивается интерполяцией полученных данных кубическим сплайном.

В соответствии с экспериментальными данными неоднородная часть задается в виде суммы довольно крупных одиночных неоднородностей (до 100 км) и мелкомасштабных возмущений, полностью заполняющих жемчужины, для которых используем ВВ $N = N_0 \cdot (1 + \Delta N_1 + \Delta N_{BB})$, где ΔN_1 описывает крупномасштабные неоднородности, а ΔN_{BB} – мелкомасштабные структуры.

Из рисунка 2.23 видно, что модель состоит из четырех слоев неоднородностей на различных высотах от hmF2 до 860 км. Высоты слоев увеличиваются к экватору. Соответствие этой модели реальной структуре ионосферы можно проверить сравнением экспериментальных и модельных ионограмм.

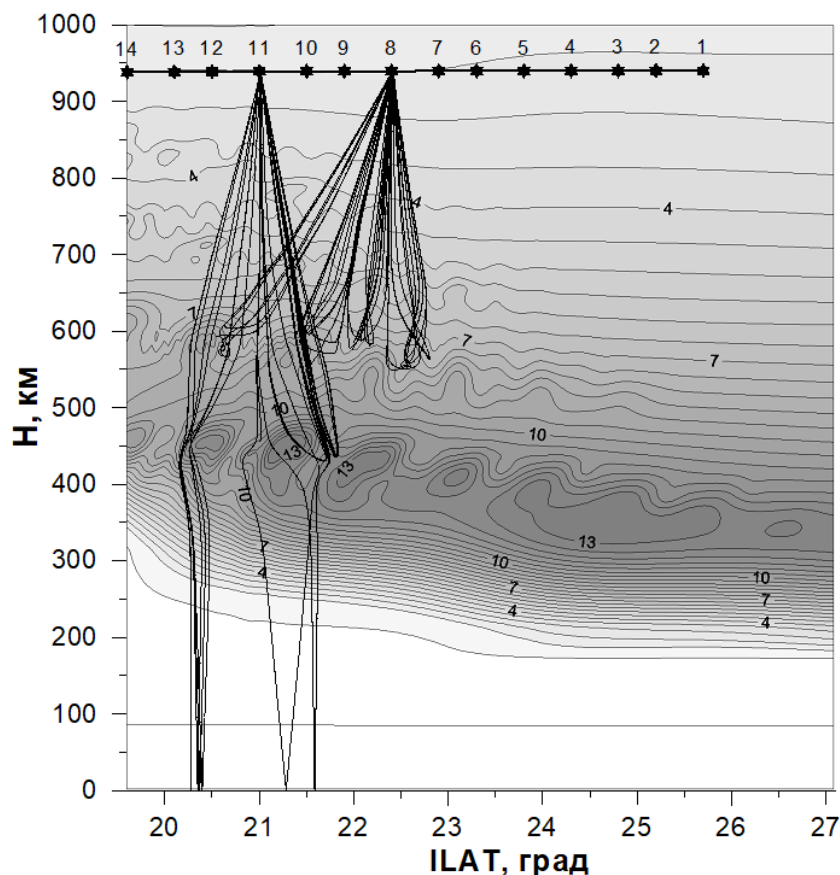


Рисунок 3.23 - Модель для интерпретации серии последовательных ионограмм с необычными следами вместе с траекториями: 1) ионограмма 8, частота 8 МГц, 2) ионограмма 11, частота 14 МГц. Местоположения ионограмм с наблюдаемыми исследуемыми структурами показаны сверху на высоте спутника звездочками

Моделирование ионограмм состоит в нахождении лучей, вернувшихся обратно в точку излучения (в нашем случае на спутник), используя для решения граничной задачи описанный выше «комплексный» 2D-метод. Меридиональная и широтная базовые плоскости позволяют достаточно точно получить размеры размытой области и считать, что остальные точки расположены внутри ее границ.

На рисунке 3.23 приведены траектории, лучи которых дают вклад в точки на ионограммах: для структуры вблизи foF2 на ионограмме 8 и частоты 8 МГц и для облака вблизи foF2 на ионограмме 11 с частотой 14 МГц.

Рисунок 3.24 показывает модельную ионограмму, которую нужно сравнивать с экспериментальной ионограммой на рисунке 3.21б и ионограммой 11 на рисунке 3.23. Это сравнение рисунка 3.24 и рисунка 3.21б показывает большое сходство. Стоит подчеркнуть, что в модель ионосферы заложено наличие неоднородностей разных масштабов, чтобы заполнить жемчужину на рисунке 3.24. Нужно отметить, что на экспериментальной ионограмме отражения от земли не наблюдались из-за помех, зато наблюдались следы в районе 80 км в силу свойств приемника. Таким образом, показана корректность модели.

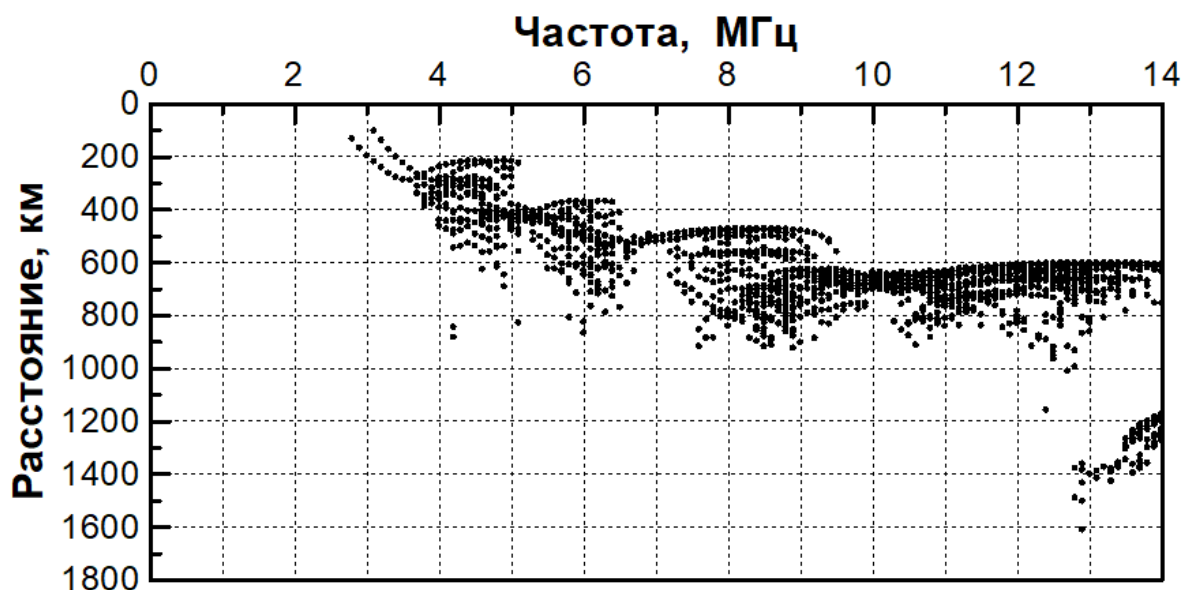


Рисунок 3.24 - Рассчитанная ионограмма для сравнения с экспериментальной ионограммой на рисунке 3.21б

Выводы

Обнаружение и интерпретация необычных сложных ионограмм ИК-19, содержащих 4 слоя положительных неоднородностей во всей толще внешней ионосферы, показали, что пространственный размер может достигать до 100 км (начиная от нескольких километров), а

интенсивность в виде положительного отклонения может достигать ~100%. Кроме того, показана связь зашумленности ионограмм с проникновением шумов наземных станций.

К сожалению, такая мощная структура больше не наблюдалась, что связано с рядом причин: использование аналоговых ионограмм с более высоким качеством, чем цифровые, большой параболической антенны, установленной в 1981, за счет благоприятных условий в ионосфере (параметры гребня), хотя на экваториальных ночных ионограммах ВнЗ в 30% случаях наблюдается сильное F-рассеяние. Кстати, по данным спутника Alouette-1 наблюдалась одна жемчужина 18 октября 1962 г. также в экваториальной ионосфере [173] вдоль силовой линии. Из рисунка 3.22 видно, что высоты слоев неоднородностей увеличиваются к экватору и никак не связаны с силовой линией. Можно констатировать, что такая мощная структура обнаружена и описана впервые.

3.7. Ионограммы внешнего зондирования при наличии мелкомасштабных неоднородностей

Уже ранние исследования [2-5,10] показали, что мелкомасштабные неоднородности N_e часто присутствуют вблизи максимума слоя F2 ионосферы (как ниже, так и выше его высоты). Это подтверждается и с помощью ионограмм вертикального и внешнего зондирования. Поэтому моделирование ионограмм в таких условиях имеет важное значение в рамках исследования неоднородной структуры ионосферы. В этом разделе на основе работ [160,161] будет детально изучен данный вопрос для случая внешнего зондирования.

Для этого воспользуемся моделью ионосферы вида $N = N_0 \cdot (1 + \delta)$, где N_0 – невозмущенная часть, δ – дополнительное возмущение, описывающее мелкомасштабные неоднородности и задаваемое суммой достаточного числа перемещающихся ионосферных возмущений (ПВ) с малыми длинами волн в интервале от 2 до 20 км (1.34). Отметим, что для каждого ПВ параметры задаются случайным образом, что позволяет качественно воспроизвести влияние мелкомасштабных неоднородностей на распространение радиоволн.

Для иллюстрации дается одна из ионограмм спутника «Космос-1809»: сеанс 17.05.1987 UT=22:36, высота 937 км, северное полушарие, рис. 3.25. Четко видны О- и Х-следы, по которым был восстановлен невозмущенный $N(h)$ -профиль (красная линия). Размытие основного следа с частотой, превышающей 2,5 МГц, связано с присутствием отражений от мелкомасштабных неоднородностей, подтвержденное моделированием. Рассеяние в узком диапазоне частот указывает на пространственную компактность неоднородных структур.

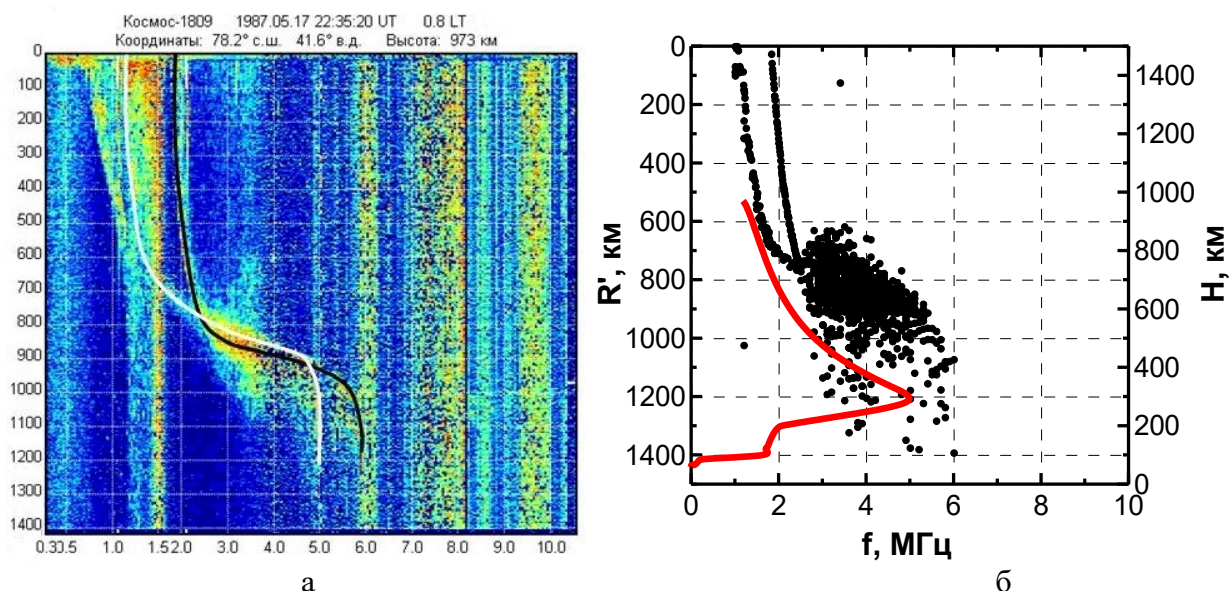


Рисунок 3.25 - Ионограмма спутника «Космос-1809» 17.05.1987 UT=22:36 со следами рассеяния (а) и восстановленный $N(h)$ -профиль ионосферы (красная линия) в результате численного моделирования (б)

Особенностью цифровых ионограмм спутника «Интеркосмос-19» являлась фиксация только 3 первых отражений, в результате которой размытость видна не так заметна. Иллюстрацией является рисунок 3.26а: сеанс 02.08.1979 в UT=14:12, высота 629 км. Тем не менее, ионограммы очень похожи.

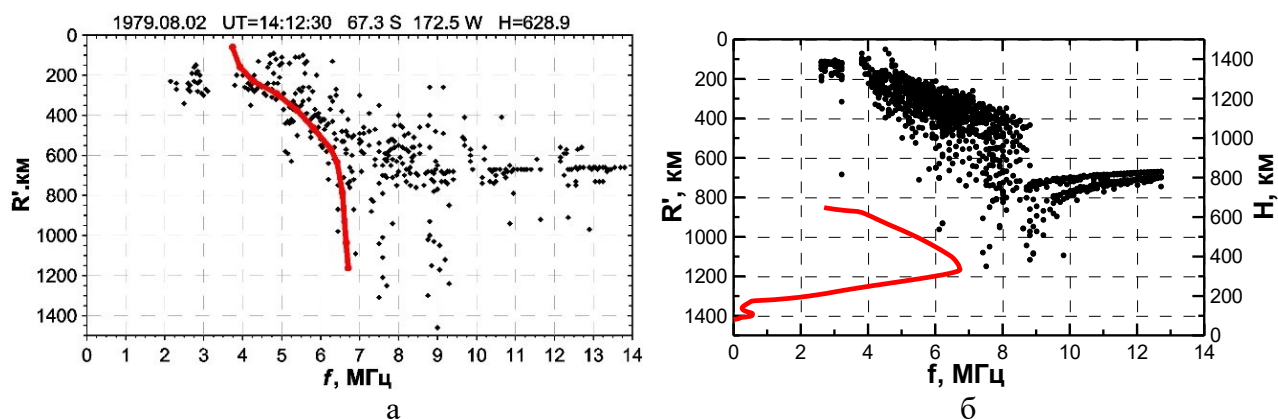


Рисунок 3.26 - Ионограмма спутника ИК-19 02.08.1979 UT=14:12 со следами рассеяния (а) и восстановленный $N(h)$ -профиль ионосферы (красная линия) в результате численного моделирования (б)

Рисунки 3.25-3.26 подтверждают непротиворечивость экспериментальным данным предлагаемой схемы задания мелкомасштабных неоднородностей и численного моделирования их влияния на ионограммы внешнего зондирования.

3.8. Выводы

Интерес к изучению верхней ионосферы возрос в связи с появлением систем спутниковой связи, для функционирования которых требуется знание состояния ионосферы выше максимума слоя F2. Это явилось причиной создания еще одного типа зондирования ионосферы – внешнего зондирования, которое осуществляется со спутников и позволяет определять параметры верхней ионосферы, которые нельзя получить при зондировании с земли. Это привело к необходимости решения основной проблемы, которой является интерпретация сложных спутниковых ионограмм и которая поставила задачу восстановления Nh-профилей верхней ионосферы, осложненную наличием неоднородностей. Актуальность решения этих проблем возрастает в связи с выводом на орбиту в 2024-2025 годах в составе космической группировки четырех спутников "Ионосфера-М", оснащенных спутниковыми ионозондами. В данной главе предложены принципы описания и интерпретации сложных ионограмм на примере ИСЗ ИК-19. Их особенностью является использование численных методов траекторных расчетов при восстановлении профилей электронной концентрации вдоль траектории движения спутника. Анализ экспериментального материала позволил обнаружить такие особенности, как ранее неизвестные следы, в частности, наклонные отражения от Земли, задержанный нижний след, рассеянные и многократные следы, жемчужины, волноводные следы. Интерпретация этих особенностей, проводимая также с использованием численных траекторных расчетов в возмущенной среде, позволила объяснить экспериментальные данные наличием неоднородностей различных масштабов в верхней ионосфере. Получена статистика наблюдений неоднородностей в зонах экваториальной аномалии, главного ионосферного провала. Оценены размеры мелких и крупных неоднородностей. Подтверждена возможность волноводного распространения КВ в верхней ионосфере. В ряде случаев дана информация о механизмах возникновения неоднородностей.

Результаты, приведенные в этой главе, опубликованы в [160,161,163,166,168,170-172,174,175,179-183].

Глава 4. Методика коррекции ионосферной модели на основе экспериментальных данных

Для задания условий распространения радиоволн в ионосфере необходима коррекция любой эмпирической модели (например, IRI, NeQuick, SIMP), которая допускает этот вариант.

Например, особенностью Международной справочной модели ионосферы IRI (International Reference Ionosphere) является осреднение параметров за месячный период. Это в полной мере относится к представлению одной из важнейших характеристик, высотных зависимостей электронной концентрации $N(h)$ -профилей или электронной плазменной частоты $f_N(h)$ -профилей. Считается, что модель IRI дает фоновое распределение плазмы, которое нуждается в корректировке по разным доступным данным: ВЗ, НЗ, измерениям полного электронного содержания (TEC), (в английском варианте total electron content, TEC) ниже орбиты систем навигационных ИСЗ ГЛОНАСС/GPS.

Поэтому параметры модели для заданного момента времени и пункта на поверхности Земли отличаются от реальных. Для иллюстрации можно привести цифры погрешности для Ne по модели IRI-2007 на широтах, меньших 60° , составляющие 15-25% в диапазоне высот 200-1000 км. Для высоких широт погрешность еще больше. Такая точность не является удовлетворительной, поэтому предлагались различные методы адаптации (например, [25-32]), но большинство для конкретного региона [25, 26, 29]. В работе [27] речь идет только о TEC, в [28, 30] – о критической частоте foF2.

С целью решения указанных проблем, а также проблем, отмеченных в предыдущих разделах, в данной главе разработан метод коррекции глобальной модели ионосферы по экспериментальным данным, полученным при проведении различных типов ионосферных исследований.

4.1. Основные принципы коррекции ионосферной модели

При переходе от использования традиционных одиночных или однотипных экспериментов для определения ионосферных параметров к возможности использования расширенных типов и объемов экспериментальных данных, предоставляемых в результате развития новых технологий, возникает вопрос, может ли совмещение данных различных экспериментов увеличить точность результатов.

В настоящее время к типам ионосферных наблюдений, доступных для коррекции, можно отнести все типы зондирования, рассмотренные в диссертации:

- вертикальное зондирование (наземное и спутниковое);
- трансзондирование;
- наклонное и ВНЗ зондирование;
- измерения ТЕС на сети спутниковой навигационной системы GPS или ГЛОНАСС.

В основе предлагаемого метода коррекции лежат два утверждения.

Первое. Так как обычно доступно довольно малое количество данных, на основе которых можно построить «нулевое приближение», целесообразно в качестве такого приближения выбрать глобальную модель ионосферы.

Второе. В отличие от традиционных методов коррекции предлагается использовать не абсолютные значения параметров, а их отклонение от «нулевого приближения», и оказалось, что такой метод обладает определенным преимуществом в большей гладкости зависимости отклонений от координат.

Блок-схема метода корректировки представлена на рисунке 4.1.

1. Для выбранного типа наблюдений определяются значения основных ионосферных параметров по всем соответствующим экспериментальным данным.
2. По разнице величин, полученных из экспериментальных данных и из модели «нулевого приближения», находятся коэффициенты коррекции в опорных точках (местах проведения измерений).
3. Используя эти коэффициенты, рассчитываются аналогичные параметры в произвольной точке нужного региона.
4. Получив все отклонения и используя предложенную ионосферную модель, можно восстановить искомую трехмерную картину околоземной плазмы в исследуемом регионе.

Коррекция проводится для ключевых параметров, которые получены при обработке ионограмм ВЗ: foE и hmE слоя E; $foF1$ и $hmF1$ (если слой F1 присутствует), $foF2$ и $hmF2$ (если слой F2 хорошо определяется), вспомогательные параметры (например, для слоя F2 параметры $V0$, $V1$, уровень F-рассеяния и др.).

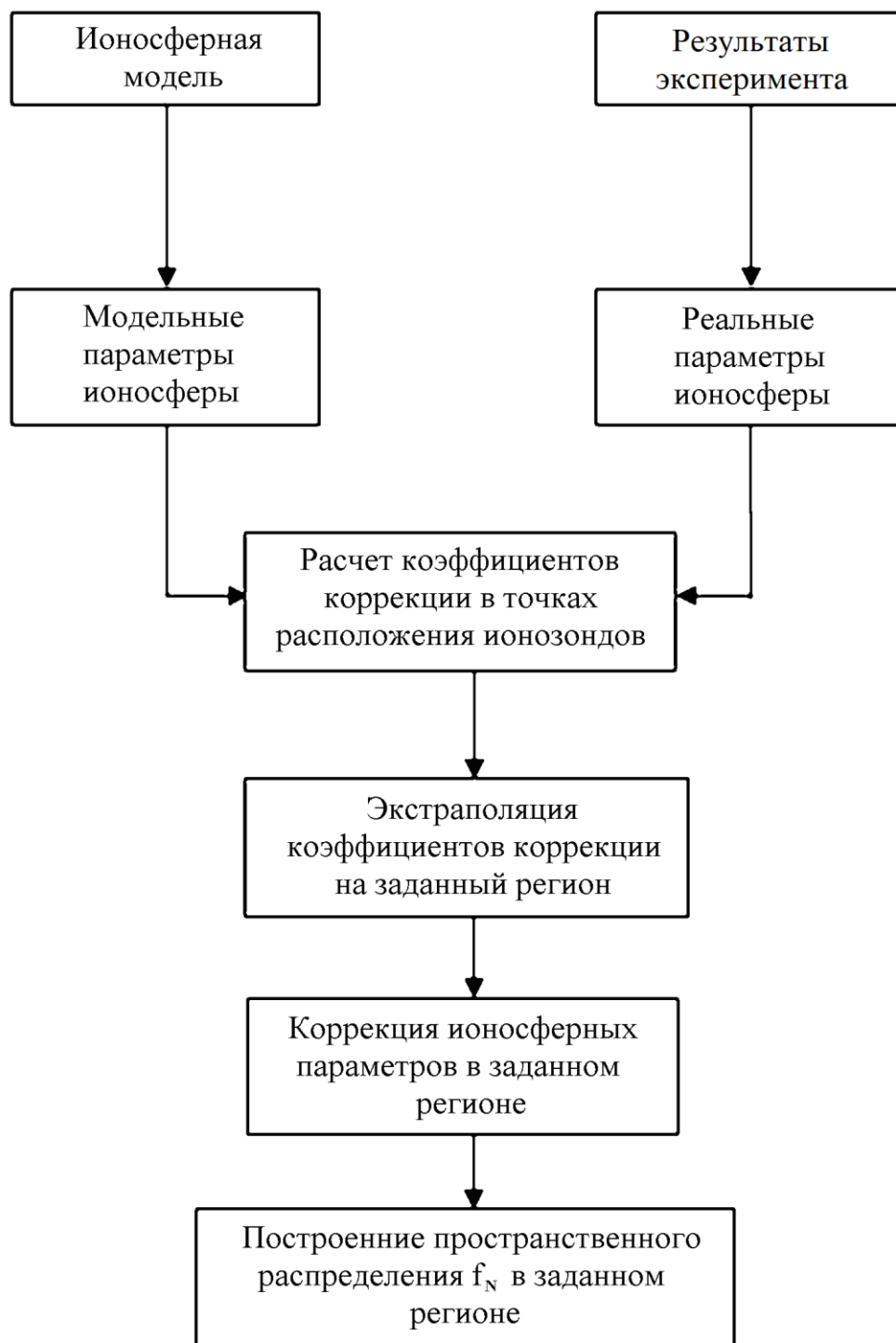


Рисунок 4.1 - Этапы предлагаемого метода коррекции модели ионосферы

Определение коэффициентов коррекции в опорных точках

На первом этапе, используя модель «нулевого приближения» ионосферы, получаем параметры для времени зондирования и координат станций. Далее вводится коэффициент коррекции, описывающий отличие экспериментальных значений параметров от модельных:

$$K_i = \frac{Z_{i\,real}}{Z_{i\,mod}}.$$

Здесь K_i – коэффициент коррекции i -го параметра; $Z_{i\,real}$ – экспериментальное значение, $Z_{i\,mod}$ – значение «нулевого приближения» этого параметра.

Определение плазменной частоты в любой точке заданной области

Используя рассчитанные коэффициенты коррекции, можно получить скорректированные основные параметры в опорных точках, а значения для восстановления модельного профиля IRI по заданным параметрам в любой точке получаются их аппроксимацией методом кригинга [184-186]. Введя основные параметры в ионосферную модель IRI, можно построить распределение плазмы в данный момент времени, которое является скорректированной трехмерной моделью в регионе.

4.2. Моделирование комплексного эксперимента по коррекции ионосферы

Для апробации предложенного метода коррекции был проведен модельный эксперимент с использованием измерительного комплекса «ионосферные станции–спутник» в определенный период времени.

4.2.1. Постановка задачи и методика решения

Для проведения модельного эксперимента выбрали реальные пункты – Москва и Ростов-на-Дону (см. рисунок 4.2) в качестве базовых ионосферных станций и предположили движение спутника с ионозондом на борту на высоте 600 км с юго-запада на северо-восток.

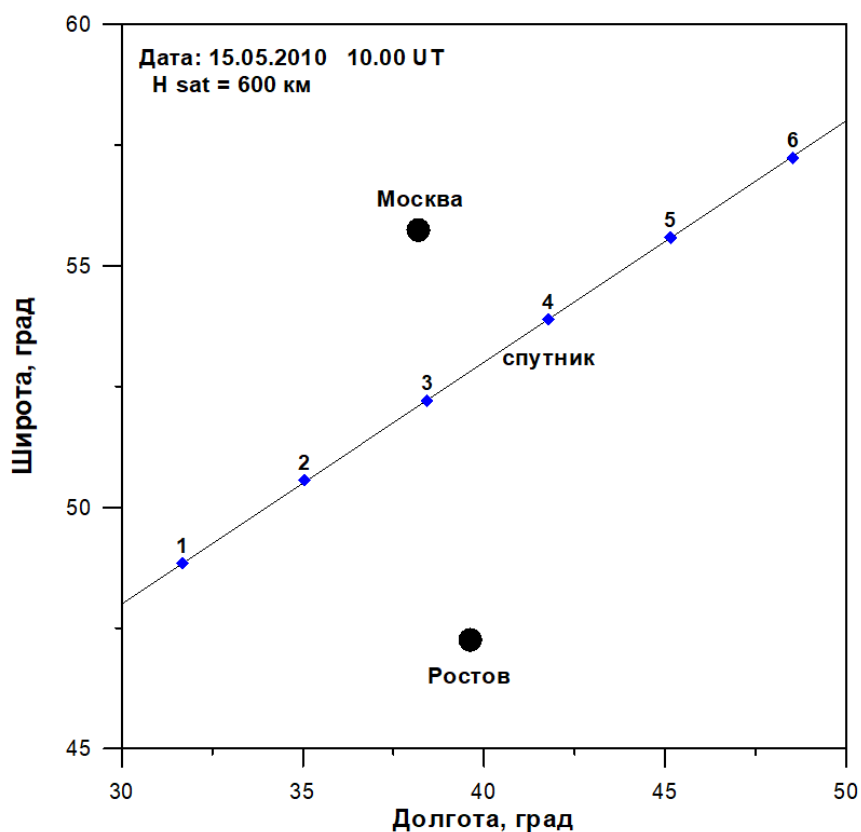


Рисунок 4.2 - Схема моделируемого эксперимента

Первый этап включает модель эксперимента, в котором используются 4 типа ионограмм:

- полученных наземными ионозондами;
- внешних со спутника;
- наклонную на трассе между ионозондами;
- трансииограммы типа «спутник-ионозонд».

Эксперимент начинается 10.00UT 15.05.2010г. Характеристики ионосферы совпадают с моделью IRI [78,164]. В качестве «экспериментальных» данных использовались траекторные расчеты методом характеристик в среде, наиболее приближенной к реальной ситуации (трехмерно-неоднородная магнитоактивная ионосфера с переменным магнитным полем).

Набор «экспериментальных» измерений состоит из ионограмм всех типов зондирования: 1) вертикального, 2) наклонного, 3) спутникового внешнего, 4) трансиионосферного. В первом случае это две ионограммы в точках наблюдения, во втором случае это ионограммы зондирования на трассе «Москва-Ростов», в третьем случае 6 ионограмм, снятых за сеанс порядка три-пять минут, в последнем случае это 12 ионограмм на трассах «спутник-Москва» и «спутник-Ростов» одновременно с внешними ионограммами.

Обработка этого набора позволяет восстановить:

- 1) профиль до высоты максимума $hmF2$ по ионограммам ВЗ,
- 2) профиль от $hmF2$ до высоты спутника $hsat$,
- 3) foE и $foF2$ в середине трассы путем решения обратной задачи до соответствия с экспериментом,
- 4) примерные координаты пересечения лучами $hmF2$, а также $foF2$. В последнем случае необходимо дополнительное моделирование транзиограмм (также решая обратную задачу).

Полученные таким образом частичные наборы параметров в 21 географической точке различаются в зависимости от типа измерений. Однако у них есть и единственное общее значение $foF2$ и примерная высота $hmF2$.

Используется следующий план обработки.

1. Путем достижения совпадения модельной и экспериментальной действующей дальности на нескольких частотах восстанавливаются профили нижней ионосферы (до высоты максимума) по данным наземного зондирования (двум вертикальным ионограммам) и находятся отличия основных параметров E-области, долины, областей F1 и F2 от IRI. Из-за отсутствия данных о нижней (ниже максимума) ионосфере будем считать, что и в остальной исследуемой области отличия примерно такие же (для каждой точки коэффициент отличия рассчитывается по двум точкам с разными весовыми значениями).
2. Расчет профиля внешней ионосферы из спутниковых ионограмм с помощью поправочных коэффициентов к модели IRI для нескольких опорных точек выше $hmF2$.
3. Поиск значений foE и $foF2$ до совпадения максимальных частот модельной ионограммы с экспериментальными по результатам п.1 и решения обратной задачи для ионограммы на трассе «Москва-Ростов».
4. Поиск $foF2$ и $hmF2$ до совпадения частоты отсечки с экспериментальной по результатам п.1 и п.2 решения обратной задачи для транзиограммы.
5. Восстановить трехмерную ионосферу с использованием всех полученных отклонений.

4.2.2. Процесс восстановления трехмерной структуры ионосферы

Как и выше, использовалась модель IRI в качестве «нулевого приближения», что позволило учесть многие особенности ионограмм. С целью отличия от «реального» состояния ионосферы она задавалась для другого исходного момента времени. На рисунке

4.3 показана разница между «реальной» ионосферой и «нулевым приближением».

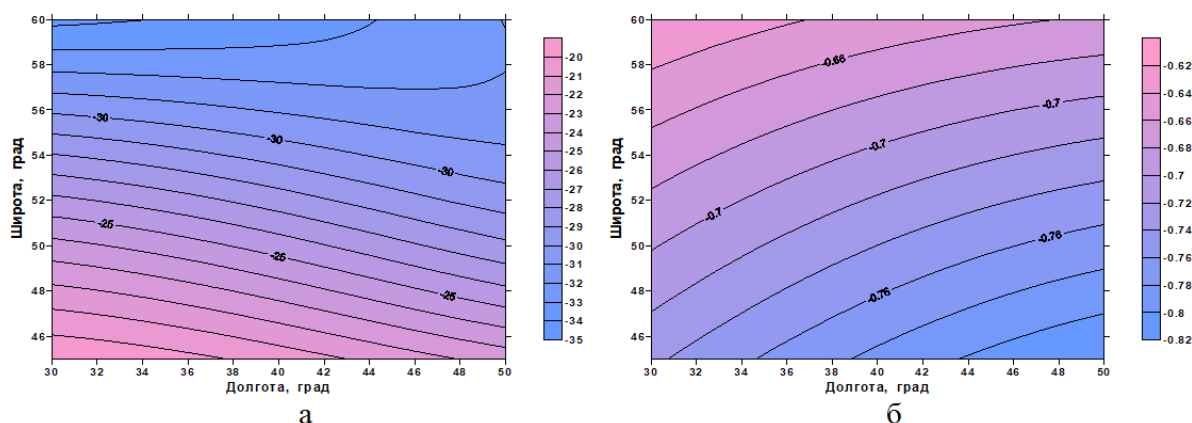


Рисунок 4.3 - Сравнение разницы широтно-долготного распределения параметров для: а) $hmF2$ и б) для $foF2$ между «нулевым приближением» и реальной ионосферой

Для приближения модели к реальному распределению «нулевым приближением» может быть прогнозная модель в трехмерном варианте. Процесс построения разбивается на 2 этапа: 1) по ионограммам вертикального и наклонного зондирования, трансииограммам определяем ключевые параметры, 2) по ним определяем плазменную частоту в заданной точке.

Определение ключевых параметров в различных точках

Первый шаг заключается в расчете ионограмм различных типов зондирования и подстройка их до максимальной близости к реальным ионограммам. Для вертикального наземного зондирования получаем модифицированный IRI-профиль, максимально приближенный к реальному, при контроле по действующим высотам и ключевые параметры: foE , hmE , $foF1$, $foF2$, $hmF2$. Второй шаг первого этапа заключается в восстановлении профиля верхней части и определении параметров: $foF2$, $hmF2$, значение F_n на некоторых опорных высотах. Третий шаг первого этапа включает подбор параметров ионосферы до совпадения модельных и экспериментальных МПЧ для E- и F2-следов в точке поворота траектории на трассе «Ростов-Москва». Получаем foE , $foF2$.

В принципе можно использовать данные по второму скачку.

Поскольку имеются 12 трансииограмм «ИСЗ-ионозонд», на четвертом этапе можно получить значение критической частоты слоя F2 в точке пересечения лучом высоты $hmF2$.

Определение плазменной частоты в любой точке

Результаты описанных 4-х этапов позволяют построить таблицу 4.1, включающую параметры.

Таблица 4.1. Сводная таблица ключевых ионосферных параметров в различных точках

N_Pnt	Tip	Lat_pnt, degr	Lon_pnt, degr	FoE, MHz	HmE, km	FoF1, MHz	FoF2, MHz	HmF2, km	Fo400, MHz	Fosat, MHz
1	1	55,73	38,2	3,125	109,5	4,25	5,25	252,8		
2	1	47,24	39,64	3,25	110	4,4	5,8	252,7		
3	2	48,84	31,68				5,71	251	3,736	1,715
4	2	50,56	35,05				5,61	250,3	3,652	1,68
5	2	52,21	38,42				5,47	249,9	3,566	1,645
6	2	53,89	41,78				5,38	248,9	3,488	1,614
7	2	55,58	45,15				5,27	247,7	3,417	1,583
8	2	57,23	48,52				5,18	247,9	3,367	1,561
9	3	51,487	38,987	3,177	109,75	4,329	5,638	253,928		
10	4	52,33	34,686				5,495	250,027		
11	4	53,155	36,53				5,431	250,264		
12	4	53,97	38,315				5,357	250,723		
13	4	54,823	40,031				5,403	250,587		
14	4	55,704	41,682				5,253	249,423		
15	4	56,587	43,258				5,15	248,165		
16	4	48,109	35,722				5,759	251,954		
17	4	48,923	37,421				5,73	252,379		
18	4	49,727	39,061				5,635	253,168		
19	4	50,57	40,634				5,424	253,426		
20	4	51,442	42,143				5,403	252,381		
21	4	52,317	43,578				5,502	251,168		

Приводятся следующие обозначения:

N_Pnt, Lat_pnt, Lon_pnt – для номера точки и ее географических координат;

Tip – тип ионограммы, соответствующий типу зондирования (1 – вертикальному, 2 – спутниковому, 3 – наклонному, 4 – транзиограмма).

Если имеются, то приводятся параметры ионосферных слоев FoE, FoF1, FoF2, HmE, HmF2.

Для типа №2 берутся плазменные частоты:

Fo400 – на высоте 400 км;

Fosat – на высоте спутника.

Во втором столбце указан тип зондирования, а в первом столбце – номер прибора, в третьем и четвертом столбцах даются координаты приборов, т.е. номера 1 и 2 в первом столбце соответствуют ионозондам, а в столбцах 3-4 даются их координаты. Номера 3-8 в первом столбце соответствуют 2 во втором столбце, т.е. спутниковому эксперименту, и столбцы 3-4 показывают координаты спутника в момент снятия внешних ионограмм. Номер 9 в первом столбце относится к типу эксперимента, т.е. к наклонному зондированию и к середине наклонной трассы. Точки 10-21 в первом столбце в соответствии с 4 во втором столбце относятся к измерению транзиограмм и точки в столбцах 3-4 соответствуют координатам середины проекции трассы транзиограммы «спутник-ионозонд» на поверхность Земли.

Все эти данные входят в процедуру для восстановления профиля IRI с требуемыми ключевыми значениями в любой точке. При этом, параметрами служат их отношения к

модельным IRI-значениям. Аппроксимация выполняется методом кригинга.

Таким образом, получаются основные параметры слоев, подстановка которых в модель IRI дает необходимый профиль.

4.2.3. Результаты моделирования

Данный раздел представляет результаты численного эксперимента, в котором необходимо сравнить «реальный» профиль и профиль «нулевого приближения» для оценки их соответствия. На рисунке 4.4 такое сравнение проведено для двух произвольных точек. Соответствие профилей можно считать полным.

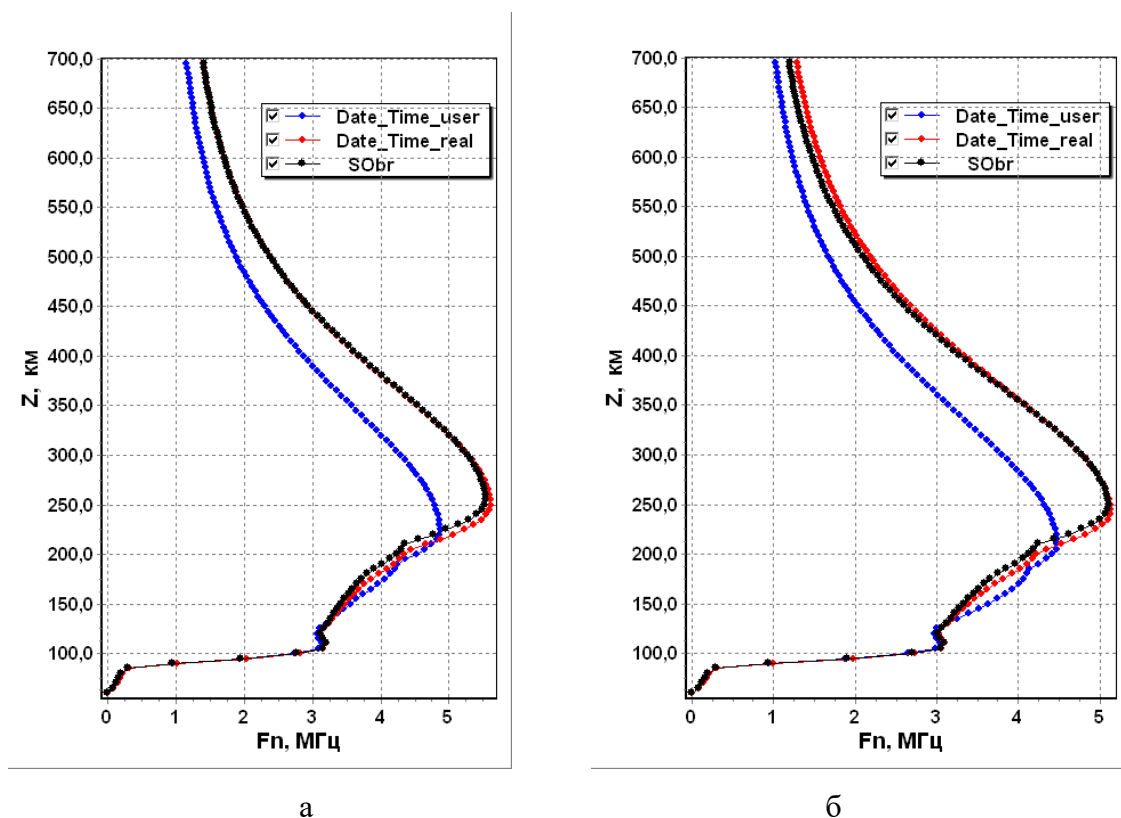


Рисунок 4.4 - Результаты численного эксперимента для двух положений ионозонда (а и б): «реальный» профиль ионосферы из эксперимента представлен красной линией, профиль «нулевого приближения» показан синей линией, а полученный при обработке данной методикой – черной линией

На рисунках 4.5-4.6 показаны распределения отклонений параметров рассчитанного профиля от «реальных» в выбранной области. На рисунке 4.5 – для f_oF2 и h_mF2 , на рисунке 4.6 – для плазменной частоты f_n на высотах 200 км и 400 км.

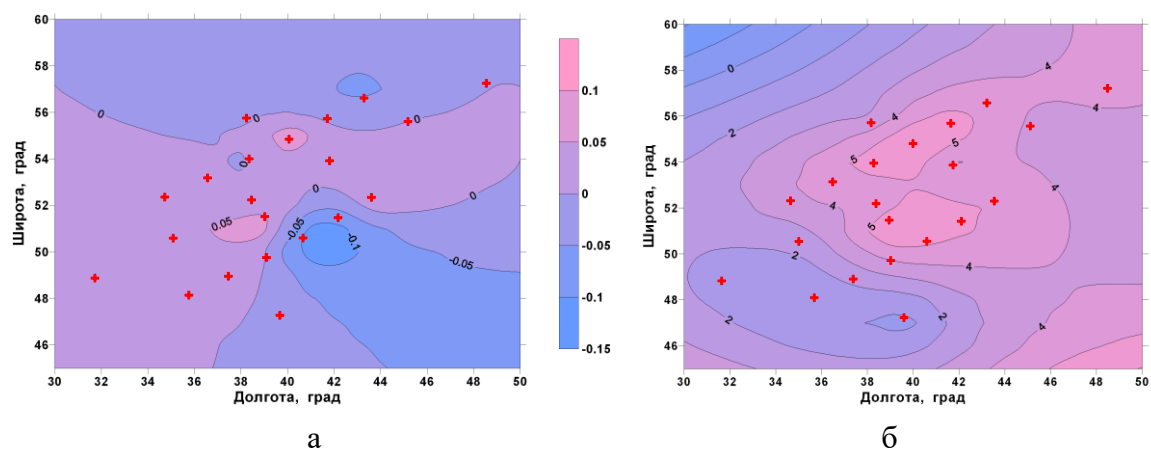


Рисунок 4.5 - Пространственное распределение отклонений foF2 (а) и hmF2 (б) слоя F2, рассчитанных предложенным методом, от реальных значений

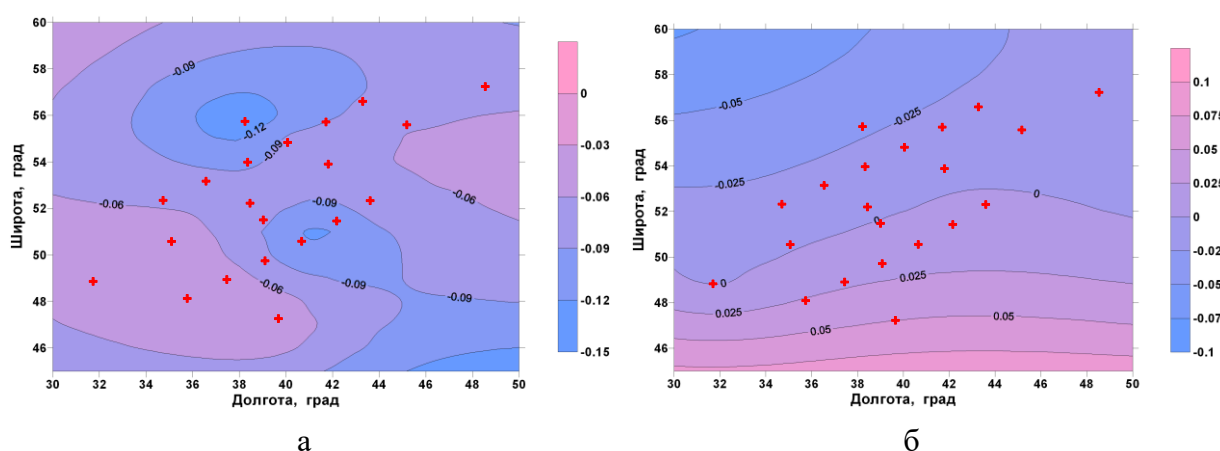


Рисунок 4.6 - Контурные карты отклонений плазменных частот от «реальных» значений для высот: (а) 200 км, (б) 400 км

Из рисунков видно, что для всех параметров погрешности не превышают погрешностей исходных ионограмм, что говорит о корректности предложенной методики. Следует подчеркнуть, что эти результаты получены для невозмущенного состояния ионосферы.

Полученные результаты опубликованы в [187].

4.3. Использование данных сети наземных ионозондов для коррекции модели ионосферы

Предлагаемый общий метод имеет существенные трудности практического применения, связанные с отсутствием в настоящее время низкоорбитальных спутников с ионозондами на борту. Поэтому в настоящий момент наиболее доступными являются данные, получаемые в результате вертикального зондирования наземными ионозондами. В связи с этим особый интерес представляет частный случай коррекции модели ионосферы по данным сети наземных ионозондов. Аналогично общему случаю сначала будет рассмотрен

модельный эксперимент по коррекции ионосферы. Затем представлены результаты применения предложенного метода к реальным экспериментальным данным.

4.3.1. Моделирование процесса пространственной коррекции модели ионосферы

Поэтапный план обработки данных состоит в следующем.

- В точках расположения ионозондов (опорных точках) находятся коэффициенты коррекции
- По этим коэффициентам коррекции в опорных точках рассчитываются аналогичные параметры в произвольной точке всего региона.
- По всем полученным отклонениям от модельных параметров, восстанавливаем трехмерную картину околоземной плазмы в исследуемом регионе, используя предложенную ионосферную модель.

Исходными данными процедуры коррекции являются основные параметры обработки ионограмм ВЗ: f_oE и h_mE , f_oF1 и h_mF1 (если слой есть), f_oF2 и h_mF2 , дополнительные параметры (например, параметры $V0$, $V1$, уровень F-рассеяния и др.).

Далее проводится эксперимент по моделированию коррекции модели ионосферы над частью территории Европы для подтверждения работоспособности метода. Область ограничена координатами (35° - 70° с.ш.) и (0° - 50° в.д.) площадью 3000×3000 км² (рисунок 4.7). Сеть наземных ионозондов представлена четырьмя существующими российскими станциями: Москва ($55.7^{\circ}N$, $37.6^{\circ}E$), Ростов ($47.2^{\circ}N$, $39.6^{\circ}E$), Калининград ($54.7^{\circ}N$, $29.5^{\circ}E$), Ловозеро ($68.0^{\circ}N$, $35.1^{\circ}E$).



Рисунок 4.7 - Область корректировки ионосферы. Звездочками указаны места расположения ионозондов

В качестве базовой модели выберем международную модель IRI-2016 [78,164]. Пусть эксперимент проводится в 10.00 UT 15.05.2014 г. «Экспериментальными» данными являются рассчитанные модельные ионограммы ВЗ в опорных точках. В качестве «нулевого приближения» выбрали модель в 10.00 UT 15.05.2010 г. Такой выбор позволяет сохранить качественный вид пространственных изменений. Рисунок 4.8 показывает разницу абсолютных значений ионосферных параметров, которая достаточно большая.

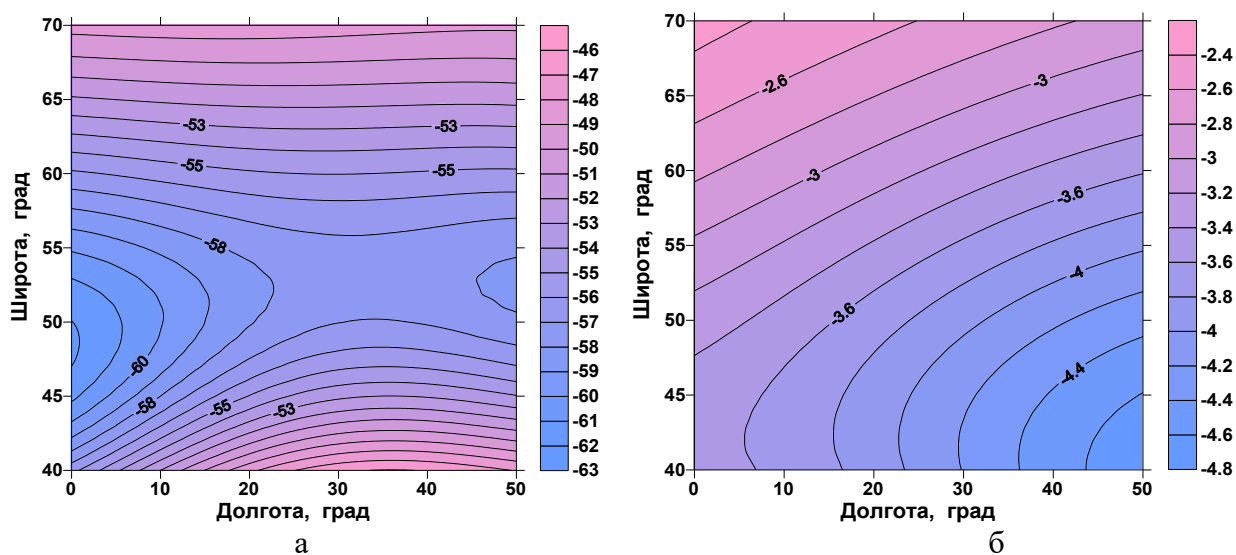


Рисунок 4.8 - Иллюстрация отличий «нулевого приближения» от реальной ионосферы для: а) $hmF2$ (км), б) $foF2$ (МГц)

Для проведения эксперимента имеем 4 ионограммы вертикального зондирования. В начальный момент распределение электронной концентрации совпадает с моделью IRI.

Процесс корректировки разбивается на две основных части: сначала по имеющимся вертикальным ионограммам в точке зондирования восстанавливается профиль ниже максимума, что позволяет выделить ключевые параметры, которые дают возможность найти плазменную частоту на заданной высоте в любой точке.

4.3.2. Результаты корректировки

Подобно рисунку 4.4 рисунок 4.9 показывает результаты проведенного численного эксперимента.

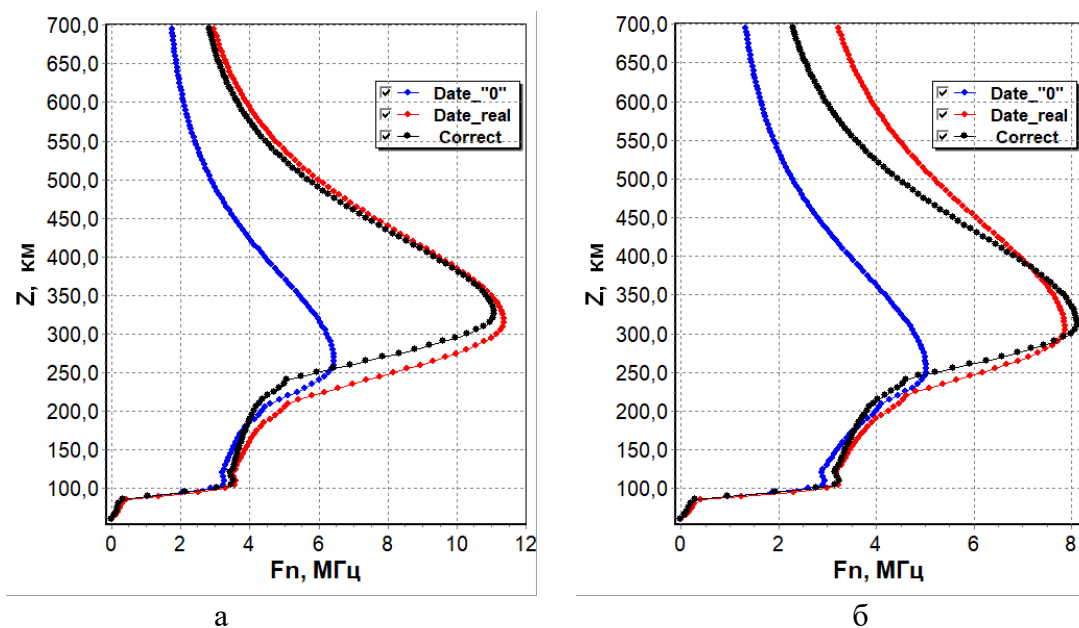


Рисунок 4.9 - Результаты численного эксперимента в конкретных точках: (40°N, 50°E) (а) и (65°N, 15°E) (б), из которых красной линией показан реальный профиль, синей линией – профиль «нулевого приближения», черной линией – профиль, рассчитанный по описанной методике

Рисунок 4.10 показывает погрешность параметров $foF2$ и $hmF2$ для скорректированного профиля. Места расположения ионозондов отмечены красными крестиками. Погрешность СКО составляет соответственно 0,13 МГц и 4,8 км.

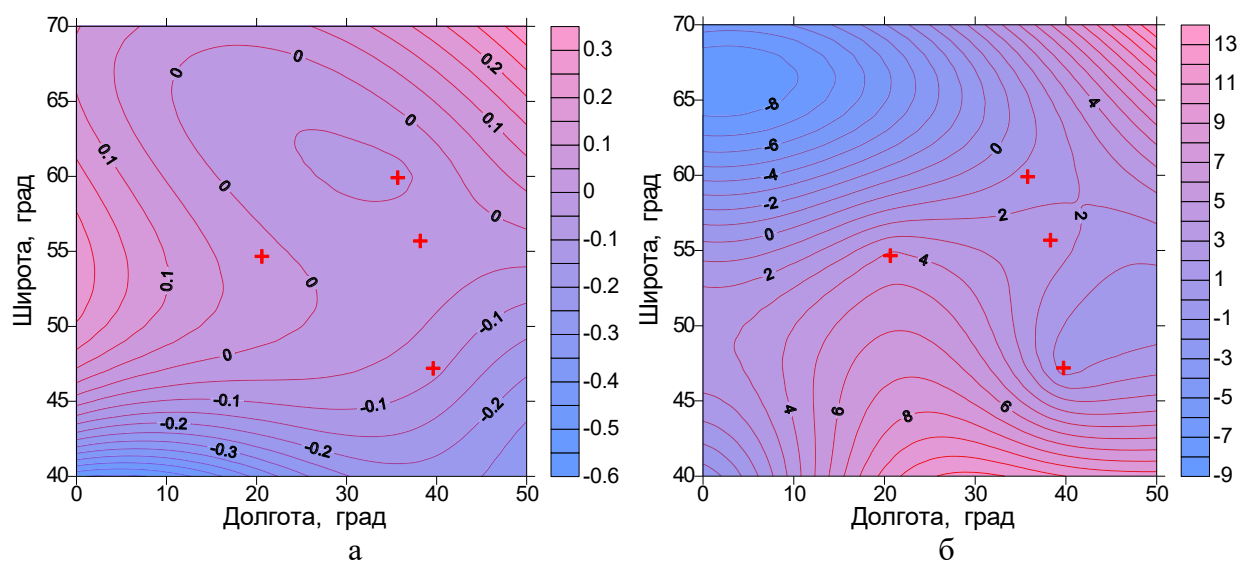


Рисунок 4.10 - Отклонения от истинных расчетных значений параметров: (а) $foF2$, (б) $hmF2$. Красными крестиками показаны места расположения ионозондов

В большинстве точек погрешность для обоих параметров не превосходила погрешность измерений исходных ионограмм. Исключения могут составлять области, наиболее удаленные от станций корректировки. Это указывает на необходимость более полного заполнения исследуемой области станциями наблюдения.

Таким образом, предложенная методика проявила себя корректной процедурой для процесса восстановления ионосферных параметров.

4.3.3. Результаты корректировки для одной станции

Поскольку глобальная сеть ионозондов не очень плотная, в заданную область может попасть не так много ионозондов, а от их числа зависит точность пространственной аппроксимации, поэтому необходимо исследовать влияние числа используемых в процессе расчетов станций на качество корректировки ионосферы. Для этого была проведена корректировка ионосферы для тех же начальных параметров с использованием данных только станции п. Москва.

Рисунок 4.11 также показывает отклонение полученных результатов от реальных, при этом погрешность по СКО составляет соответственно 0,33 МГц и 8,1 км.

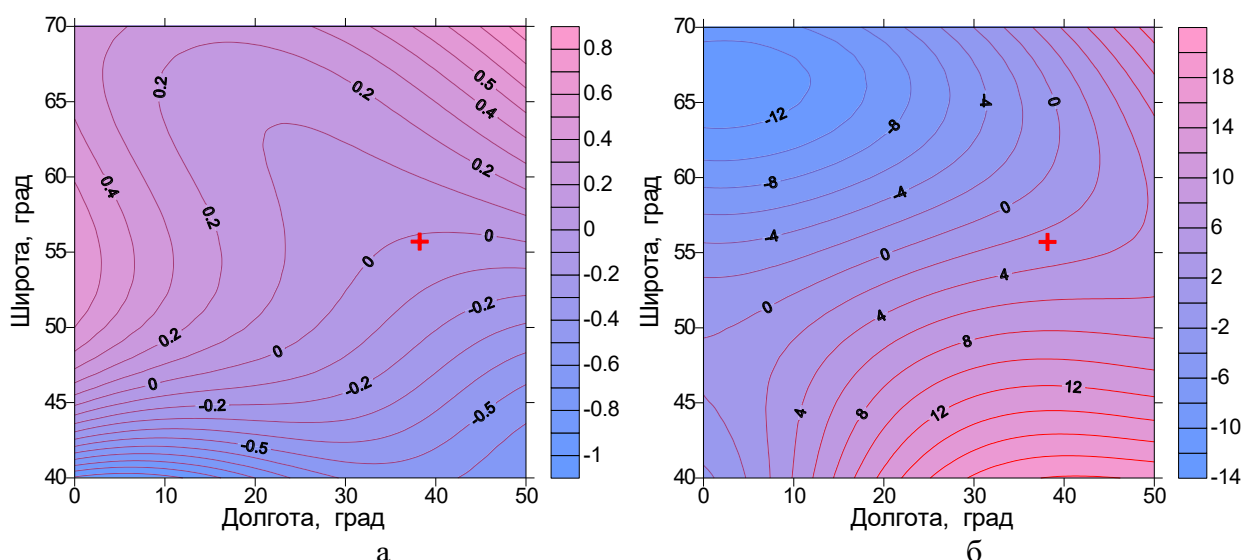


Рисунок 4.11 - Отклонения от истинных расчетных значений критической частоты $foF2$ (а) и высоты максимума $hmF2$ (б) слоя $F2$: использовались данные одного ионозонда, положение которого отмечено красным крестиком

Видно достаточное соответствие. Сравнение рисунков 4.10 и 4.11 позволяет сделать вывод о том, что при уменьшении числа экспериментальных данных качество корректировки существенно ухудшается – в данном случае до 2 раз.

По результатам проведенного модельного эксперимента можно сделать вывод о существенном улучшении точности определения ионосферных характеристик в любой точке заданной области при использовании предложенного метода коррекции ионосферы по данным нескольких разнесенных ионозондов.

Результаты данного раздела опубликованы в [115].

4.4. Оценка эффективности метода по экспериментальным данным

Чтобы оценить эффективность предложенного метода коррекции на примере экспериментальных данных, выбрали ионограммы ВЗ п. Ростов (47.2°N,39.6°E). Оценка сделана сравнением модельных и экспериментальных:

- 1) вертикальных $N(h)$ -профилей,
- 2) параметров радиотрасс,
- 3) ионограмм наклонного зондирования.

4.4.1. Сравнение вертикальных профилей плазменной частоты

При сравнении вертикальных профилей эталонными служат профили, рассчитанные из О- и Х-следов ионограммы. На рисунке 4.12 из 57 случаев выбраны два характерных примера (ночной и дневной). Видно существенное отличие параметров модели «нулевого приближения» (пунктирная линия) от реальных (сплошная линия). Количественное отличие составило в первом случае 1 МГц, а во втором – 0,5 МГц. Заметно также и различие формы профиля.

В сравнении вертикальных $N(h)$ -профилей участвует эталонный профиль, восстановленный из экспериментальной ионограммы. Он же обеспечивает значения ключевых параметров, включая V_0 , V_1 . Оценка проводится для профилей: 1) эталонного, 2) полученного для данного момента времени в конкретной точке по модели IRI-2016 (модель «нулевого приближения»), 3) скорректированного с использованием предложенного метода.

Сравнительные графики полученных профилей для обоих вариантов представлены на рисунке 4.12.

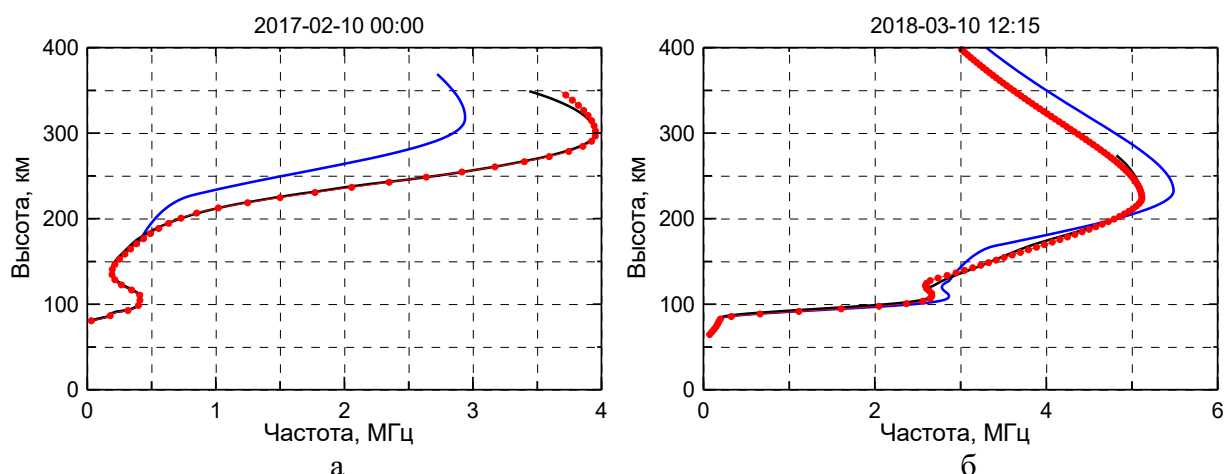


Рисунок 4.12 - Сравнение профилей электронной концентрации, участвующих в модельном эксперименте в п. Ростов в сеансах 10.02.2017 г. 00:00 UT (слева) и 10.03.2018 г. 12:15 UT (справа). Обозначения линий, как на рисунке 4.9

Получен типичный результат значительного отличия «нулевого приближения» от эталонного профиля и полное совпадение профилей после коррекции.

Различие профилей приводит к отличию характеристик радиотрасс. Рисунок 4.13 дает результаты расчета максимально применимой частоты (МПЧ), которая является важнейшей характеристикой радиотрасс с различной длиной в приближении горизонтально-стратифицированной ионосферы.

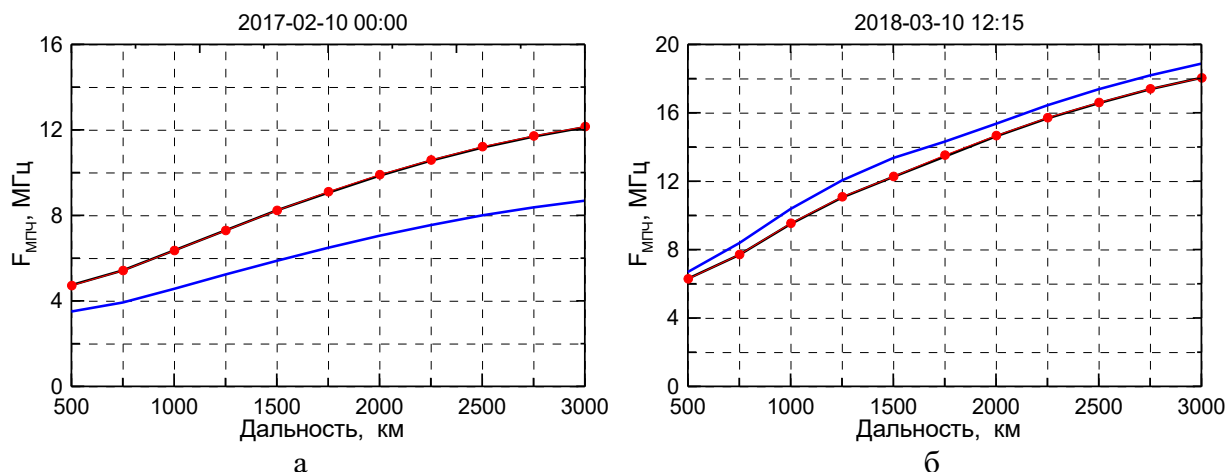


Рисунок 4.13 - Сравнение МПЧ для различных профилей и длин трасс для выбранных сеансов. Обозначения линий, как на рисунке 4.9

Графики показывают совпадение эталонных и скорректированных значений МПЧ. В первом сеансе видно увеличение расхождения между «нулевым приближением» и эталоном. Количественная оценка составила 3 МГц для эталонной длины трассы 3000 км. Во втором случае разница составила 1 МГц и была почти постоянной. Практика эксплуатации радиотрасс показывает, что такие оценки неприемлемы, особенно это относится к определению их длины. Это можно продемонстрировать на конкретном примере расчета дальности.

Длину трассы выбрали 1000 км и оптимальную частоту $f = 0.8 \cdot f_{МПЧ_1000}$. Сравнивали: абсолютную дальность D и относительную погрешность расчета дальности $\delta D = \frac{D_I - D_{real}}{D_{real}} \cdot 100\%$, где D_{real} и D_I – дальности для заданного угла вылета в реальной ($real$) и модельной (I) ионосфере. Результаты коррекции профиля, представленные на рисунке 4.14, сводятся к:

- близости построенного $N(h)$ -профиля к реальным условиям;
- совпадению рассчитанных и экспериментальных МПЧ;
- уменьшению относительной погрешности расчета дальности с 10–15% до 2–4%.

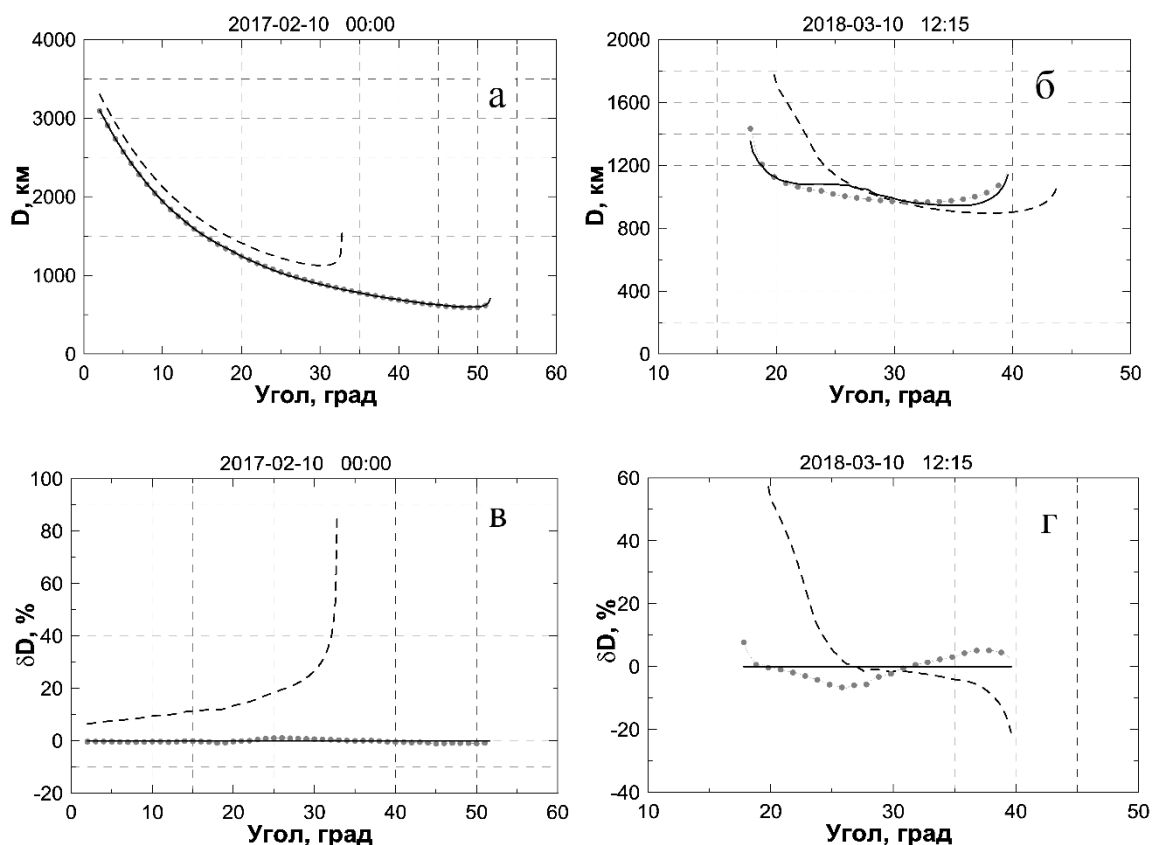


Рисунок 4.14 - Поведение D и δD в зависимости от угла излучения на фиксированной частоте для 00:00 UT 10.02.2017 г. (слева) и 12:15 UT 10.03.2018 г. (справа) в п. Ростов: абсолютная дальность (а, б) и ее относительная погрешность (в, г). Черная сплошная линия представляет расчет для эталонного профиля, пунктирная линия для профиля «нулевого приближения», серые точки – для скорректированного профиля

4.4.2. Оценка эффективности метода по данным ВЗ и НЗ на трассе Москва – Ростов

Эффективность метода по экспериментальным данным ВЗ и НЗ оценивалась в пунктах Москва (55.5°N, 37.3°E) и Ростов (47.2°N, 39.6°E).

Результаты сравнения приведены на рисунке 4.15. Рисунок 4.15а показывает профили для ионограммы ВЗ в п. Ростов. На рисунке 4.15б даются такие же результаты для п. Москва. Для восстановления профилей использовались коэффициенты коррекции в данной точке. В обоих случаях проводилось сравнение трех профилей: реального (черная кривая), «нулевого приближения» (синяя) и скорректированного (красные точки). Расхождения между скорректированным и реальным профилями составляют 0.14 МГц по критической частоте и 5 км по высоте максимума.

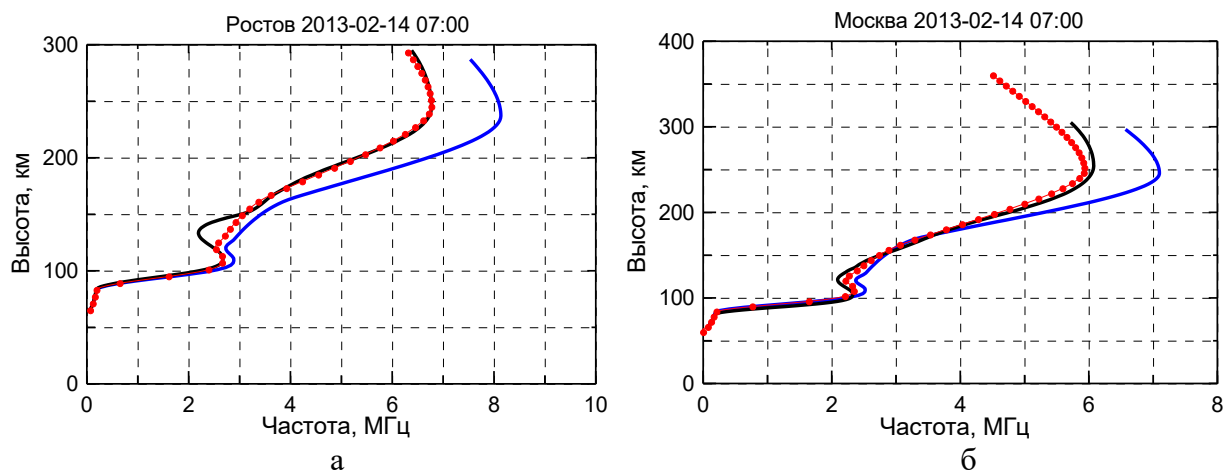


Рисунок 4.15 - Иллюстрация качества коррекции моделей для сеанса 07:00 UT 14.02.2013 г. в п. Ростов (а) и п. Москва (б). Остальные обозначения, как на рисунке 4.12

Для анализа наклонной ионограммы (длина трассы равна ~ 950 км) используется такая же методика, как для ионограммы ВЗ. На рисунке 4.16а представлено «нулевое приближение», показавшее существенное отличие от реальной ионограммы. В этом случае используются две процедуры корректировки. Первая – для одной станции (Ростов) – результаты моделирования представлены на рисунке 4.16б, вторая – коррекция по двум станциям (Ростов, Москва) – на рисунке 4.16в.

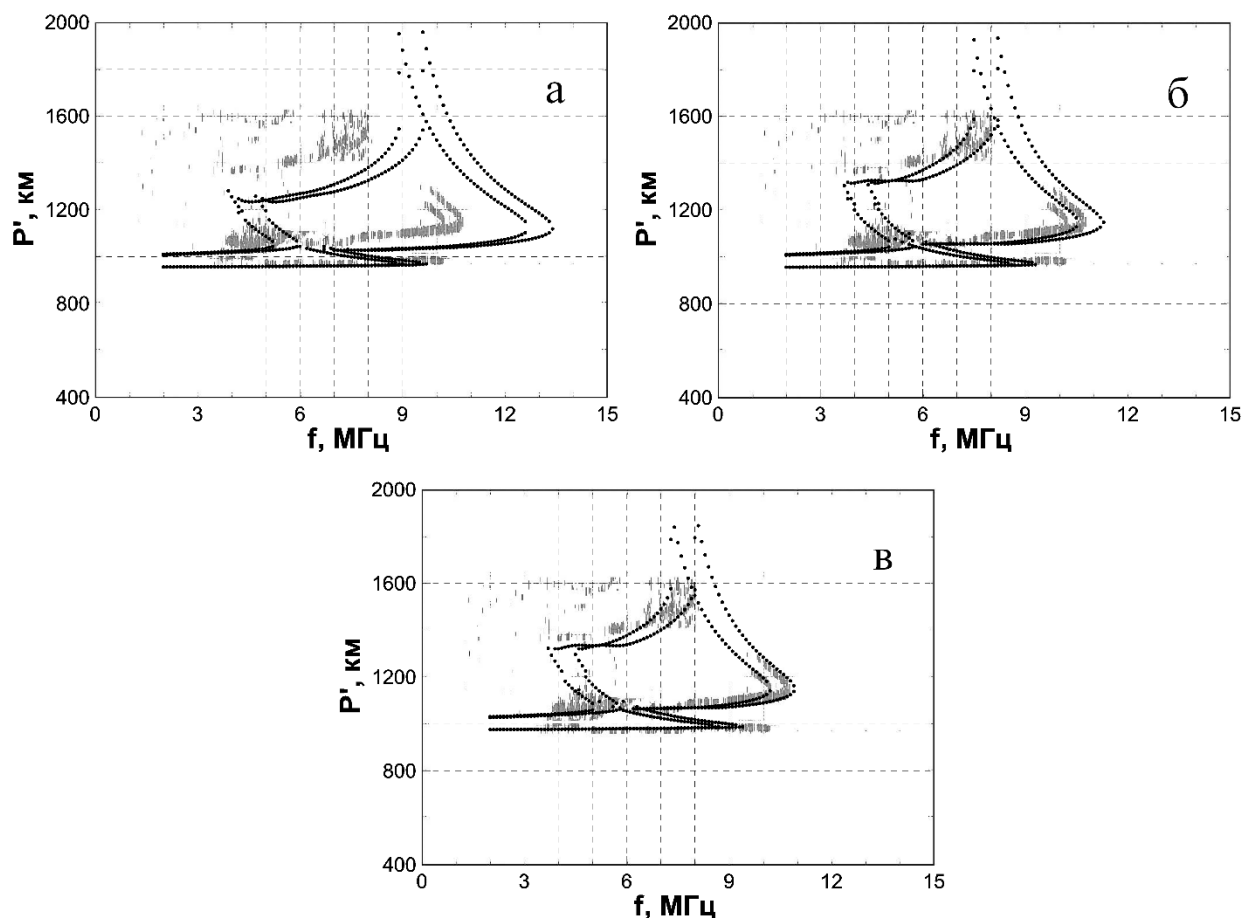


Рисунок 4.16 - Модельные ионограммы (точки) и экспериментальная на трассе Москва-Ростов в сеансе 07:00UT 14.02.2013г.: а – «нулевое приближение», б – коррекция по одной станции, в – коррекция по двум станциям

Сравнение различных модельных ионограмм с реальной наклонной ионограммой показывает, что «нулевое приближение» приводит к существенному отличию, свидетельствующему о неприменимости модели в данном случае. Коррекция приводит к улучшению соответствия, большему для случая использования двух станций, чем одной, что свидетельствует о целесообразности увеличения числа «опорных точек».

4.4.3. Сравнение экспериментальных ионограмм наклонного зондирования с модельными для трасс различной протяженности.

Для этой цели были использованы реальные ионограммы наклонного зондирования, полученные на различных трассах.

Короткая трасса

На рис.4.17 приведена одна из ионограмм для трассы Ловозеро (68°N , 35°E) – Горьковская (60°N , 29°E) длиной 950 км от 06.09.2017 в период достаточно сильного возмущения ионосферы. На рис.4.18 показано географическое расположение самой трассы (красная линия) и ионосферных станций вертикального зондирования, на основании данных которых проводилась корректировка ионосферы (черные точки).

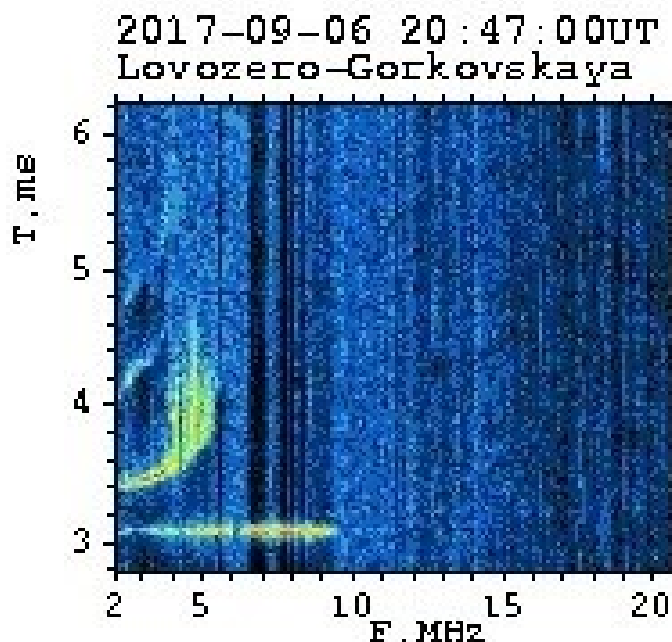


Рисунок 4.17 - Экспериментальная ионограмма, полученная на трассе Ловозеро(68°N , 35°E) – Горьковская(60°N , 29°E) в период достаточно сильного возмущения ионосферы

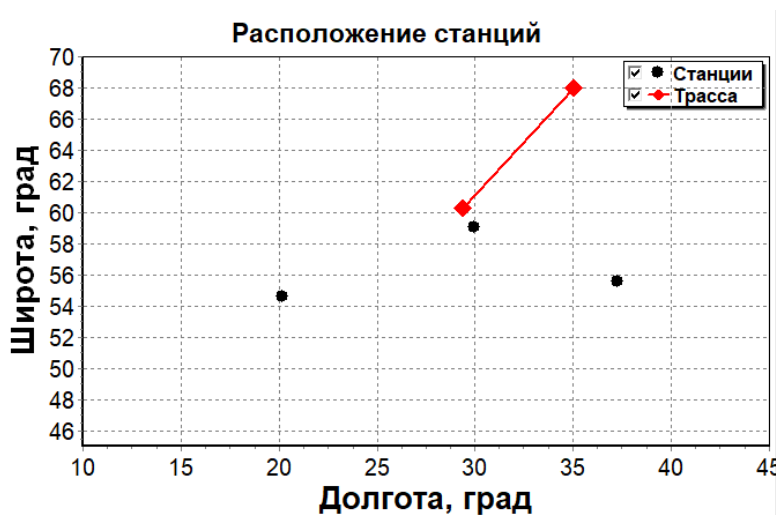


Рисунок 4.18 - Географическое расположение трассы (красная линия) и ионосферных станций вертикального зондирования (черные точки)

Сначала рассчитывалась аналогичная теоретическая ионограмма в ионосфере, которую предоставляет модель IRI-2016. Результат показан на рисунке 4.19а. Как и в предыдущих случаях, «нулевое приближение» не обеспечивает достаточное соответствие с реальной ионограммой.

Поэтому на следующем этапе использовалась коррекция модели по данным трех станций вертикального зондирования (п.п. Москва, Санкт-Петербург и Калининград). Результаты моделирования приведены на рисунке 4.19б и показывают практически полное совпадение как самого вида ионограммы, так и ее основных параметров (в т.ч. МПЧ и слоя Es).

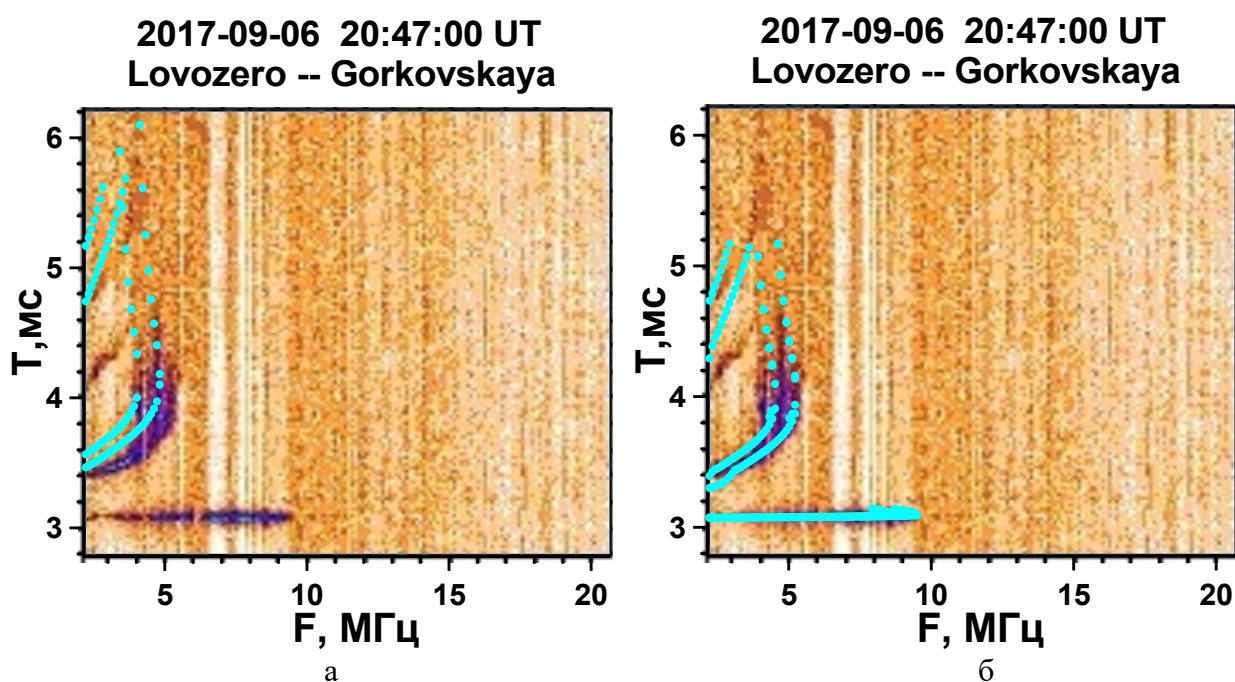


Рисунок 4.19 - Сравнение модельных ионограмм, рассчитанных по модели IRI-2016 (а), и после применения к ней описанной процедуры корректировки (б), с экспериментальной. Результаты моделирования выделены голубым цветом

Трасса средней протяженности

В качестве примера трассы средней протяженности была взята трасса Virginia (37.5°N , 77.0°W) – Mexart (19.5°N , 101.4°W) протяженностью 3100 км от 28.02.2019 (рисунок 4.20). Данная ионограмма предоставлена сотрудниками ионосферной станции Mexart.

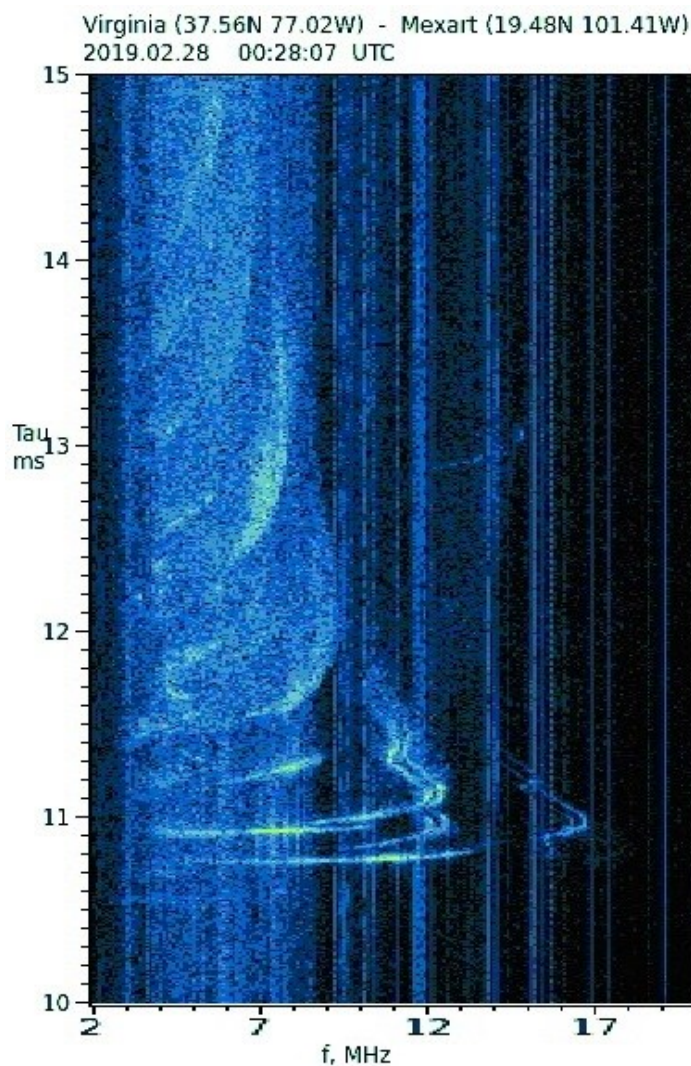


Рисунок 4.20 - Экспериментальная ионограмма, полученная на трассе Virginia (37.5°N , 77.0°W) – Mexart (19.5°N , 101.4°W) 28.02.2019 в 00.28 UTC

На рисунке 4.21 показано географическое расположение трассы (красная линия) и ионосферных станций вертикального зондирования, на основании данных которых проводилась корректировка ионосферы (черные точки).

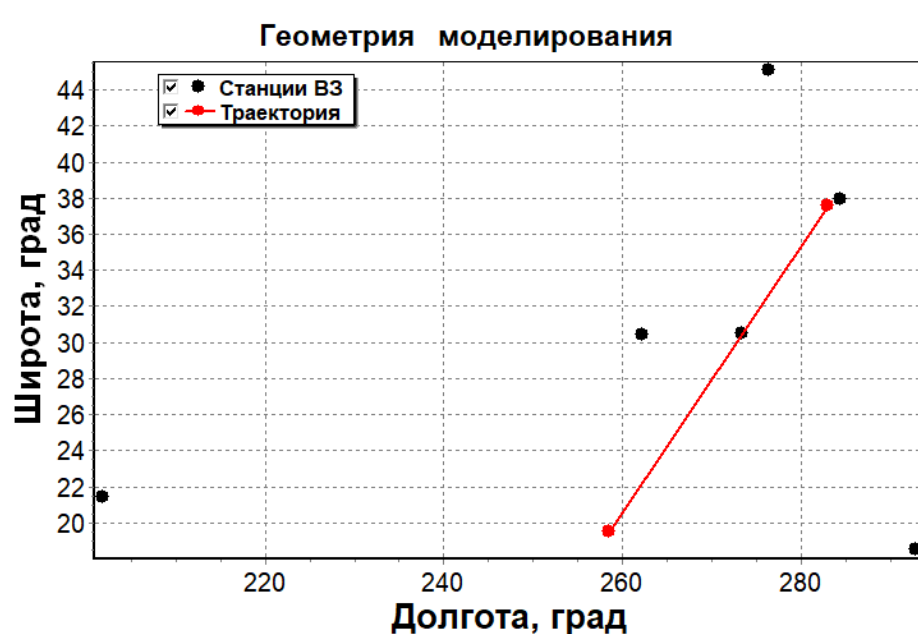


Рисунок 4.21 - Географическое расположение трассы (красная линия) и ионосферных станций вертикального зондирования (черные точки)

Изолинии электронной концентрации вдоль трассы после применения процедуры коррекции приведены на рисунке 4.22.

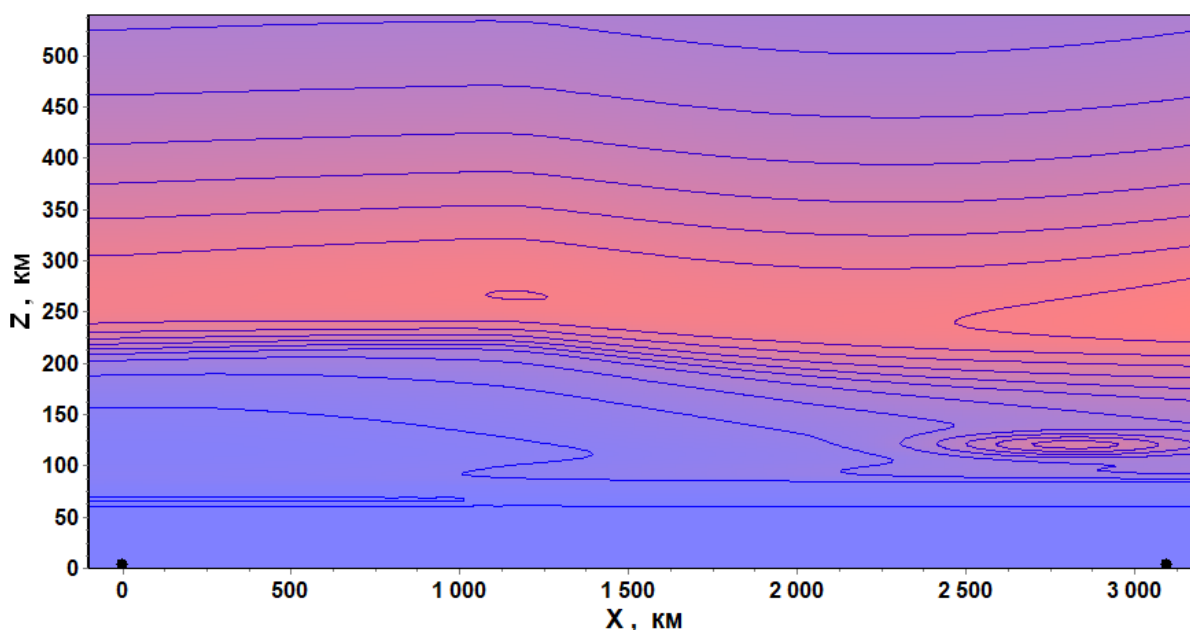


Рисунок 4.22 - Разрез профиля электронной концентрации вдоль трассы после применения процедуры коррекции. Черными точками обозначены передающая и приемная станции

Моделирование проводилось с использованием модели IRI-2016. Результаты, полученные для ионосферы, напрямую заданной моделью, показаны на рисунке 4.23а. Кроме различия в значениях основных параметров на экспериментальной ионограмме присутствуют также следы, которые не могут быть получены при моделировании.

Рисунок 4.23б соответствует результатам с учетом предложенной процедуры коррекции. На нем видно гораздо более точное совпадение основных следов и величин МПЧ. Также наличие слоя Es позволяет объяснить дополнительные следы, присутствующие в эксперименте.

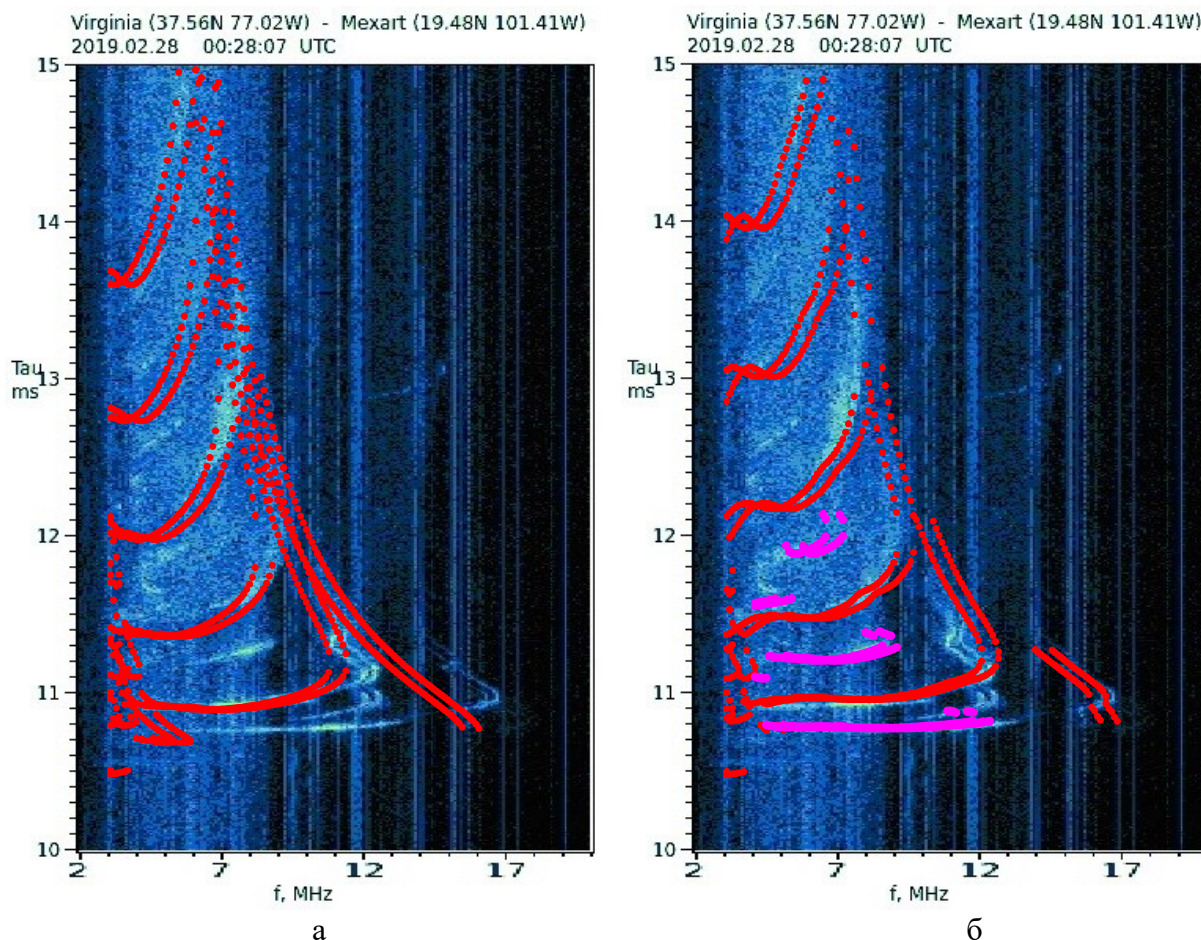


Рисунок 4.23 - Сравнение модельных ионограмм, рассчитанных по модели IRI-2016 (а), и после применения к ней описанной процедуры корректировки (б), с экспериментальной. Результаты моделирования выделены красным цветом. Розовым цветом показаны следы, связанные с наличием слоя Es

Длинные трассы

В качестве примера длинной трассы использовались результаты наклонного зондирования от 26.02.2019 между станциями Laverton (28.3°S , 122.8°E) и Mexart (19.5°N , 101.4°W) на трассе протяженностью более 15400 км (рисунок 4.24). Эта ионограмма также предоставлена сотрудниками ионосферной станции Mexart. Расположение самой трассы (красная линия) и ионосферных станций вертикального зондирования, на основании данных которых проводилась корректировка ионосферы (черные точки), изображено на рисунке 4.25.

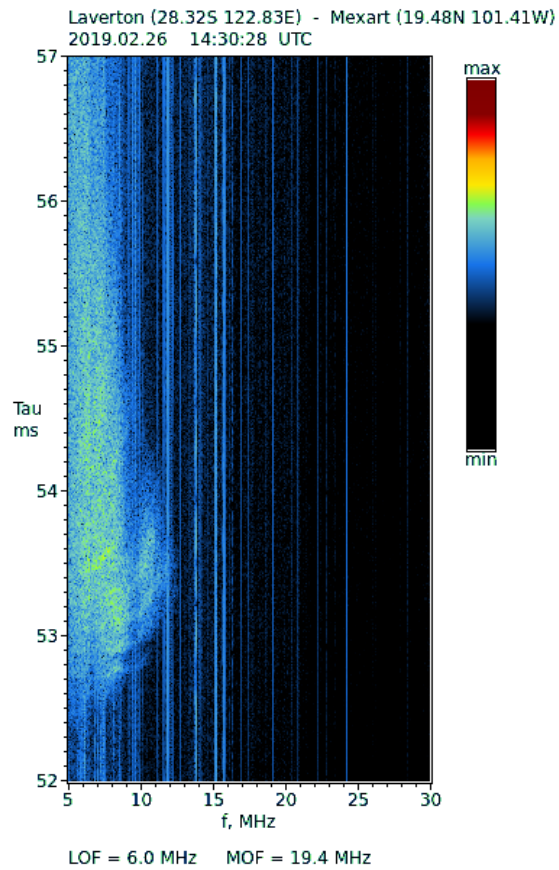


Рисунок 4.24 - Экспериментальная ионограмма, полученная на трассе Laverton (28.3°S , 122.8°E) – Mexart (19.5°N , 101.4°W) 26.02.2019 в 14.30 UTC

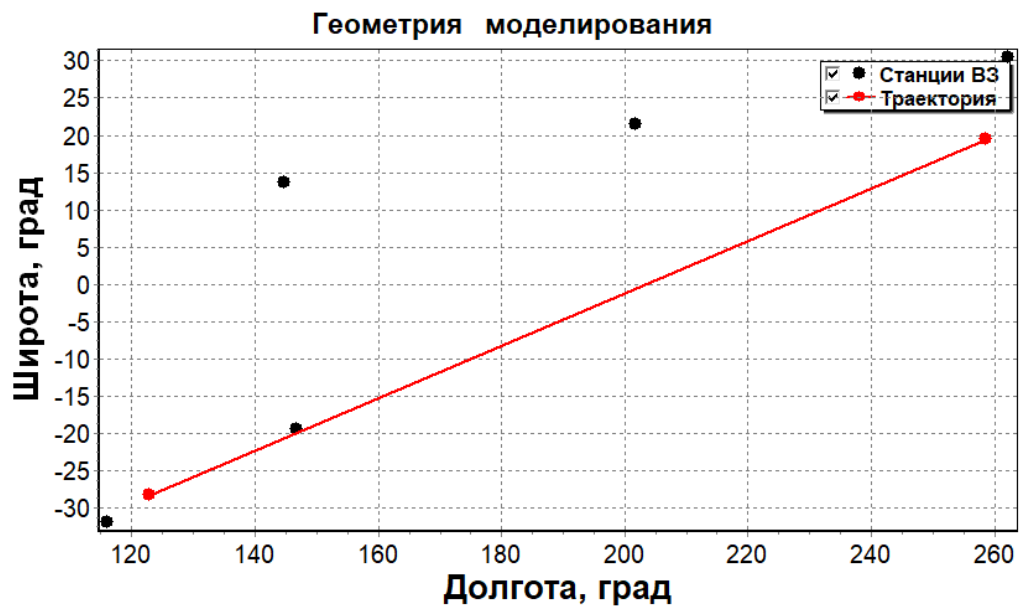


Рисунок 4.25 - Географическое расположение трассы (красная линия) и ионосферных станций вертикального зондирования (черные точки)

Изолинии электронной концентрации вдоль трассы после применения процедуры коррекции приведены на рисунке 4.26. Здесь в качестве дополнительного возмущения

использовано ПИВ с длиной волны 300 км

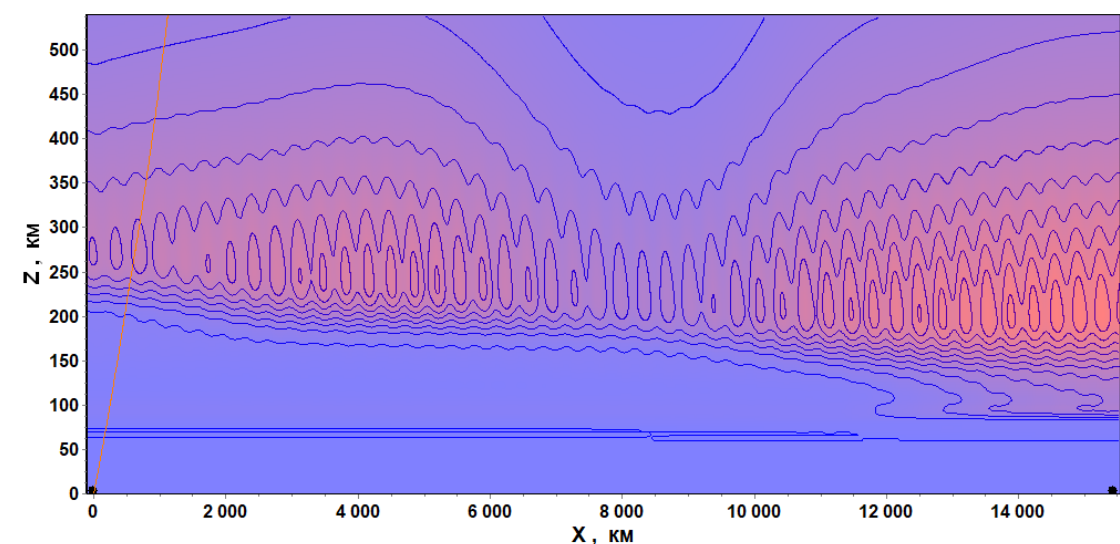


Рисунок 4.26 - Разрез профиля электронной концентрации вдоль трассы после применения процедуры коррекции. Черными точки обозначены передающая и приемная станции

Результаты моделирования наклонной ионограммы с учетом коррекции и без нее приведены на рисунке 4.27.

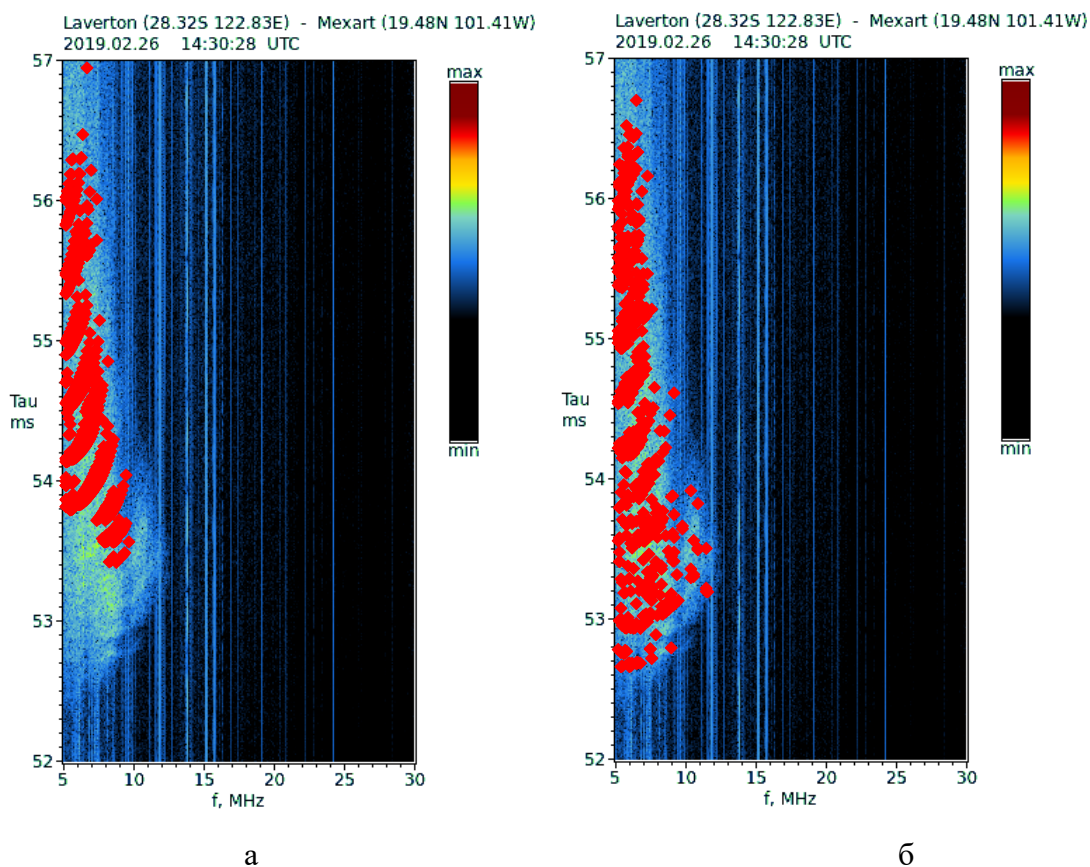


Рисунок 4.27 - Сравнение модельных ионограмм, рассчитанных по модели IRI-2016 (а), и после применения к ней описанной процедуры корректировки (б), с экспериментальной. Результаты моделирования выделены красным цветом

И в данном случае коррекция привела к соответствию с экспериментом.

Более широкий вывод заключается в том, что разработанная модель коррекции на основе модели IRI-2016 обеспечивает хорошую точность для трасс различной протяженности, как в спокойных условиях реальной ионосферы, так и в период достаточно сильного возмущения.

Представленные результаты частично опубликованы в [115,116,188-190].

4.5. Выводы

Одним из важнейших средств связи является наклонное зондирование (НЗ), для использования которого необходимо точное знание распределения электронной концентрации в ионосфере. Для получения такого распределения требуется корректировка модели ионосферы в некоторой области пространства. Если ранее для корректировки модели были доступны только данные ВЗ, то в настоящее время возникла возможность использования результатов комплексных экспериментов с привлечением данных различных типов зондирования. Для реализации этой возможности в данной главе предложен принцип коррекции, заключающийся в использовании: 1) данных различных типов зондирования, 2) численных расчетов траекторий волн, 3) коэффициента коррекции. Моделирование одного из таких комплексных экспериментов по коррекции ионосферы на основе этого принципа проведено в разделе 4.2. Пока реализация такого эксперимента затруднительна, методика применена к коррекции модели по данным сети наземных ионозондов (раздел 4.3) и к обработке данных НЗ (раздел 4.4).

Основные результаты главы можно суммировать следующим образом:

- Реализация предложенного принципа коррекции позволила максимально приблизить ионосферную модель к реальной ситуации.
- Предлагаемый метод коррекции ионосферы с использованием данных нескольких ионозондов ВЗ позволил существенно улучшить диагностику ионосферы во всей рассмотренной области.
- Проверка его работоспособности, проведенная как для численного моделирования корректировки ионосферы над частью территории Европы, так и при сравнении экспериментальных и модельных наклонных ионограмм, показала увеличение точности результатов.

- Качество результатов зависит от числа используемых ионозондов и покрытия ими рассмотренной области.
- Использование предложенной процедуры коррекции вместе с моделью IRI-2016 при обработке данных наклонного зондирования оказалось эффективным для трасс различной протяженности, как в спокойных условиях, так и в период достаточно сильного возмущения.

Результаты, приведенные в этой главе, опубликованы в [115,116,179,180,187,189] и были представлены на международных и всероссийских конференциях [181-183,188,190].

Глава 5. Разработка методов трансionoсферного зондирования и комплексного исследования ионосферы

Исследование ионосферы с помощью искусственных спутников Земли (ИСЗ) началось практически одновременно с началом космических полетов. Бортовые ионозонды были установлены на различных отечественных («Интеркосмос-19», «Космос-1809», станция «Мир») и зарубежных («Alouette», ISIS) спутниках. Ионограммы внешнего зондирования, полученные на них, являются одним из основных способов получения данных о реальном состоянии ионосферы выше высоты максимума электронной концентрации. Необходимо отметить, что спутники функционировали в разное время (в период с 1960-х по 1990-е годы) и обращались на различных орбитах, поэтому полученные массивы экспериментальных наблюдений дополняют друг друга. Обработке и интерпретации таких ионограмм посвящена глава 3 данной диссертации.

Еще одним способом изучения ионосферы с помощью КА является метод трансionoсферного зондирования, когда источник сигнала находится на ИСЗ, а приемник – на поверхности Земли, либо наоборот. Трансionoсферный метод можно использовать как отдельное средство диагностики, так и как составную часть комплекса «спутник-наземный ионозонд», включающего в себя также наземную ионограмму ВЗ и ионограмму внешнего зондирования.

В настоящее время в нашей стране выведен на орбиту высокоорбитальный космический комплекс «Ионосфера-М» с бортовыми ионозондами «Лазэрт». Этот проект, задуманный как группировка из четырёх спутников, расположенных парами на двух взаимно перпендикулярных солнечно-синхронных орбитах на высоте около 820 км, направлен на восстановление непрерывности наблюдения за ионосферой. Первая пара была успешно запущена 5 ноября 2024 года ракетой-носителем «Союз-2.1б» с космодрома Восточный в секторах местного времени 09:00 AM и 09:00 PM. Последующие запуски 25 июля 2025 года позволили второй паре развернуться в секторах 03:00 AM и 03:00 PM. Такая орбитальная конфигурация обеспечивает полное временное и пространственное покрытие.

В связи с этим на первый план выходит изучение ионосферы методами внешнего и трансionoсферного зондирования.

Современное состояние компьютерной техники позволяет проводить моделирование процессов получения трансionoсферных ионограмм. Это поможет еще на стадии разработки эксперимента понять, какие можно ожидать результаты, и поставить задачи, которые приведут к наиболее целесообразному и продуктивному использованию оборудования.

В данной главе будут рассмотрены возможности применения трансionoсферного зондирования для диагностики ионосферы и ее неоднородностей. Исследования проводятся как для низкоорбитальных типов спутников, так и для КА, расположенных на геостационарных и высокоапогейных орбитах.

В настоящее время с каждым годом увеличивается сфера применения использования систем позиционирования с использованием спутниковых систем, а также возрастают требования к их точности. Поэтому отдельное внимание будет уделено исследованию влияния на величину ионосферной задержки и, соответственно, на точность работы спутниковой навигационной системы не только глобального и регионального распределений электронной концентрации, но и различных неоднородностей.

5.1. Общие положения

Поскольку моделирование трансionoграмм требует расчета траекторий, нужно учитывать, что, как показано в главе 1, в силу неоднородности ионосферы необходимо использовать геометрикооптическое приближение на основе метода характеристик, а модель должна быть суммой базовой, невозмущенной части и возмущенной части в виде суммы неоднородностей различных масштабов.

Уравнение для решения граничной задачи при построении трансionoграммы имеет вид:

$$D(f, \Delta_0, \alpha_0) - L = 0, \quad (5.1)$$

где $D(f, \Delta_0, \alpha_0)$ – длина дуги между проекцией положения спутника на поверхность Земли и конечной точкой траектории, L – расстояние между проекцией спутника и приемной станцией. Уравнение (5.1) показывает, что D является функцией:

- 1) угла места Δ_0 волнового вектора в момент излучения,
- 2) его азимутального угла α_0 ,
- 3) рабочей частоты f .

Кроме того, при решении (5.1) необходимо учесть переотраженные от Земли лучи. Отсутствие методов поиска всех корней для уравнения с несколькими переменными приводит к необходимости упрощений.

Одно из них основано на том, что в силу малости отклонения рассчитываемых траекторий от выделенной плоскости можно перейти к двумерной задаче в плоскости спутник-приемная станция.

Второе связано с возможностью замены учета магнитоактивности среды частотными поправками к изотропному варианту, поэтому ограничились изотропным приближением.

5.2. Трансионосферное радиозондирование – метод диагностики наличия ионосферных неоднородностей

Трансионосферное радиозондирование (ТИЗ), как метод диагностики ионосферы, имеет довольно длинную историю [191-194]. Главной целью было исследование неоднородностей без учета отражений от Земли. Однако после наблюдений «двойных трансионограмм» [192], объяснить которые смогли только с учетом отражений от Земли [194], в статье [195] была показана большая роль этих отражений для прямого ТИЗ с борта ИСЗ с высот ниже $h_m F_2$. Оказалось, что в этом случае ионограммы имеют новый вид, представленный на рисунке 5.1а. На рисунке 5.1б показаны соответствующие траектории лучей, на рисунке 5.1с крестиками дан результат подгонки действующих дальностей следа отражения от Земли к реальному следу. Эти ионограммы назвали ионограммами с задержанным нижним следом (ЗНС).

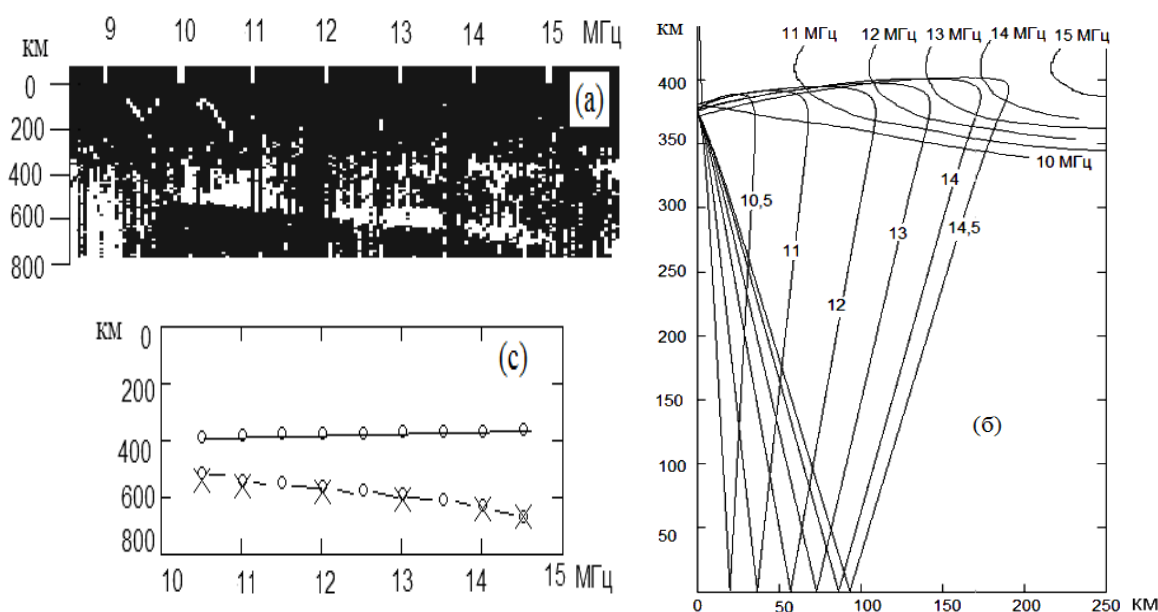


Рисунок 5.1 - Пример ионограммы нового типа с задержанным нижним следом, полученной на МКС

Поскольку ЗНС является функцией нескольких переменных, расчеты необходимо проводить в выделенной пространственной области, названной «ответственной» зоной.

В этом разделе моделируется эксперимент по трансзондированию со спутника, находящегося на высотах, превышающих $h_m F_2$. Включение траекторий с отражением от Земли является отличием и новизной. К отличиям и новизне можно отнести учет неоднородностей (средних масштабов).

5.2.1. Результаты моделирования одиночных ионограмм

Расчеты проводятся для двух ионосферных моделей с неоднородностями, названных «облаком» и «ступенькой». Рисунок 5.2 иллюстрирует эти неоднородности, причем «облако» может быть как положительным, так и отрицательным.

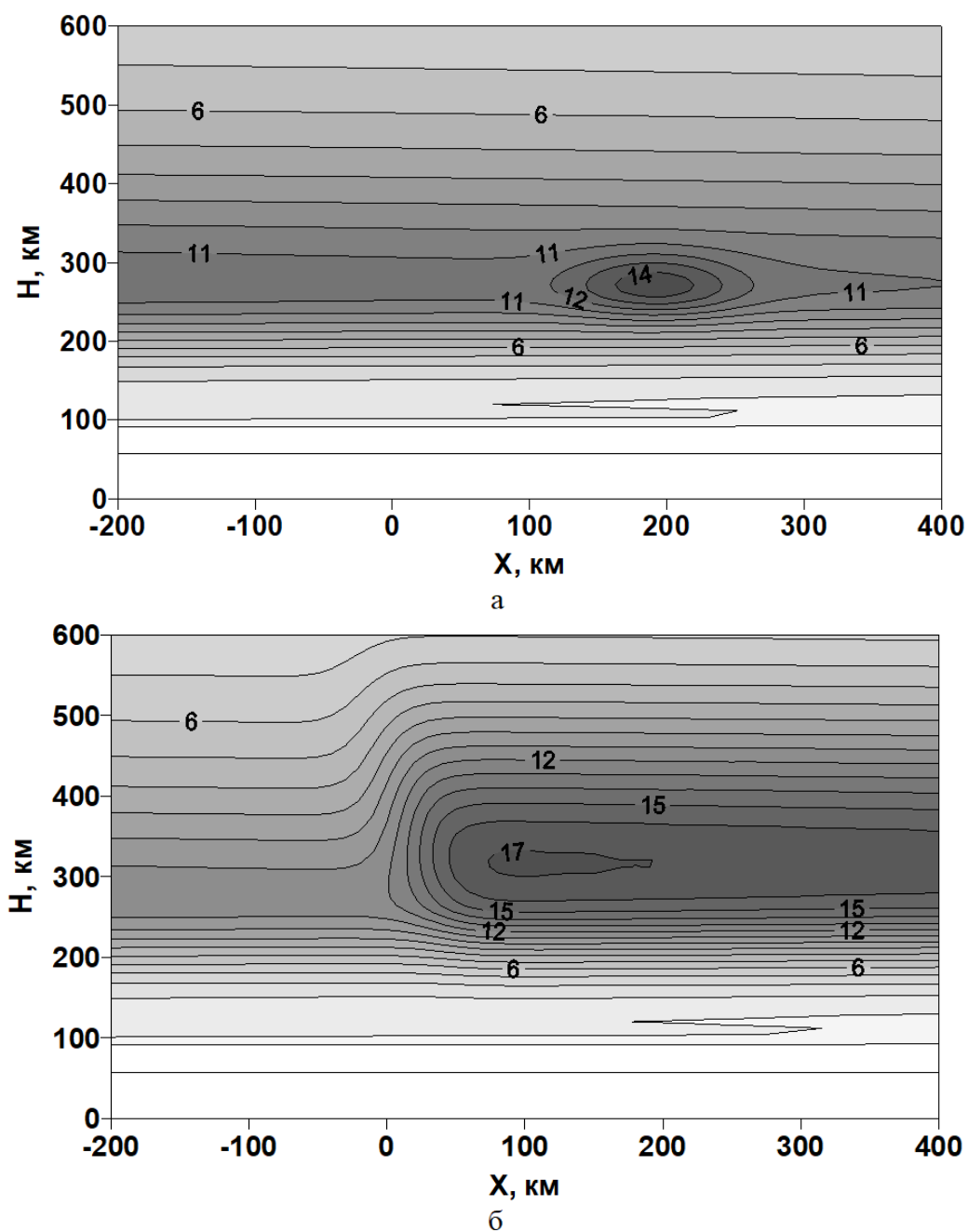


Рисунок 5.2 - Распределение плазменной частоты для случаев: «облако» (а) и «ступенька» (б)

Одной из задач является определение параметров неоднородностей, осуществляющееся с помощью расчетов траекторий в диапазоне радиопрозрачности,

который является пространством между двумя граничными лучами а и б, как показано на рисунке 5.3.

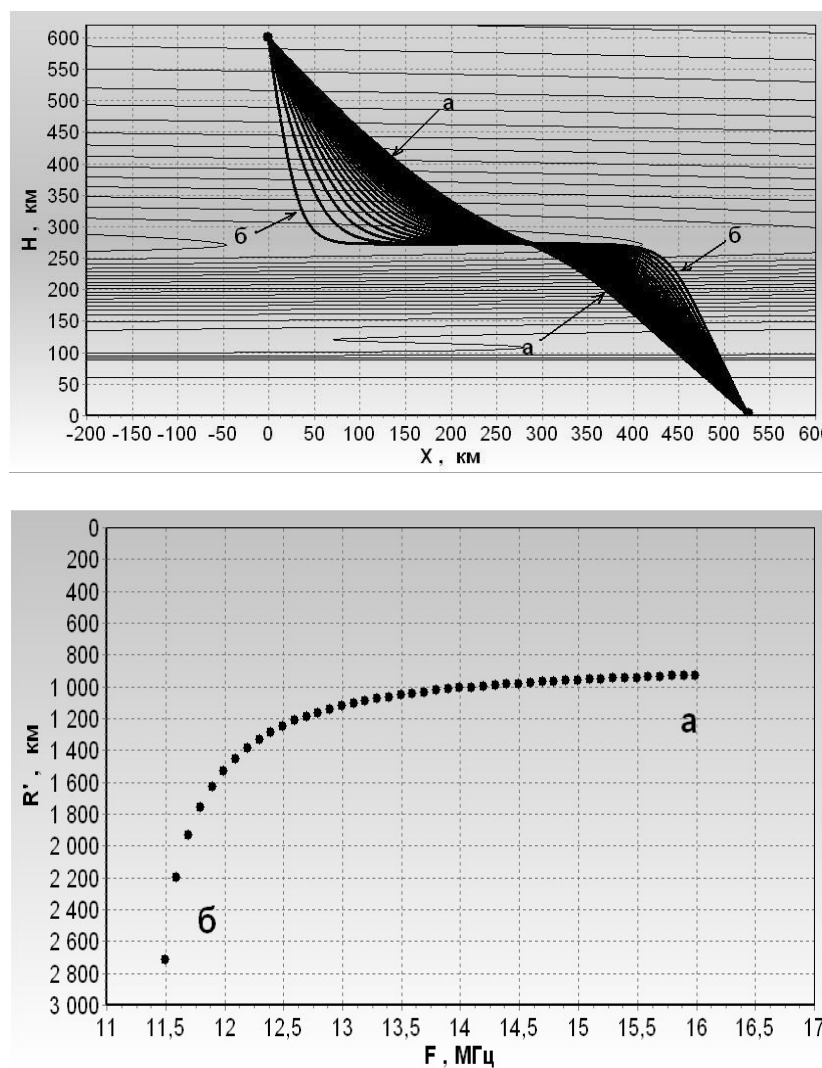


Рисунок 5.3 - Зона между граничными лучами «а» и «б», содержащая все траектории (верхний график), при отсутствии крупномасштабных неоднородностей. Соответствующая трансionoграмма приведена на нижнем графике

Граничные лучи показывают: траектории «а» с наибольшей частотой (почти прямая линия) и «б» с наименьшей частотой, немного превышающей f_oF2 . Таким образом, четко определена контролируемая область. Этому случаю соответствует простая трансionoграмма (нижний график рисунка 5.3). Примеры таких трансionoграмм можно видеть в данных спутников «ИК-19» и «КОСМОС-1809» [191-194].

Вариант одного облака

Введение облака внутрь контролируемого пространства изменяет траектории радиоволн и область контролируемого пространства. Пример дается на рисунке 5.4: а – модификация пространства, б – модификация трансionoграммы.

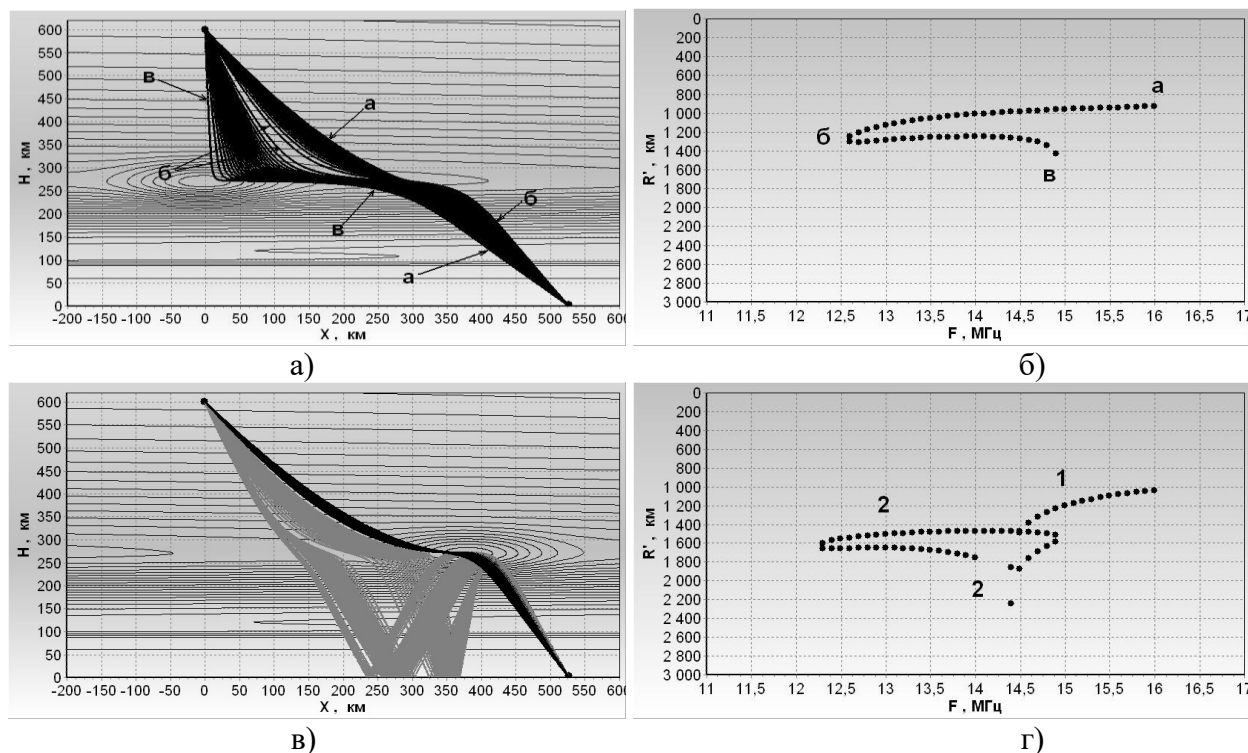


Рисунок 5.4 - Модификации траекторий радиоволн (слева) и соответствующие трансionoграммы (справа) для двух случаев присутствия одного облака (вверху – строго под ИСЗ, внизу – на удалении от него). Траектории без отражения от Земли выделены черным цветом, траектории с одним отражением выделены серым цветом. Соответствие траекторий и следов на трансionoграмме отмечено буквами, однотипные треки – цифрами

Отличием этих ионограмм является второй след. Два следа на рисунке 5.4б напоминают лучи Педерсена с увеличением действующего расстояния в области, где показатель преломления близок к нулю.

На рисунке 5.4а, б облако находится строго под спутником. Рисунок 5.4в показывает результат перемещения облака на 400 км от предыдущего положения.

На рисунке 5.4г показана совокупность треков 2, образованная лучами, отраженными от Земли, т.е. отражение от Земли добавило несколько треков на трансionoграмму. Это говорит о том, что трансionoграммы могут сильно различаться в силу таких факторов, как контрастность облака и его размеры, изменение расстояний по горизонтали от гравитационной вертикали ИСЗ.

Вариант двух неоднородностей типа «облако»

Рисунок 5.5 показывает результаты моделирования для более реального случая двух неоднородностей типа «облако», когда одно «облако» находится под спутником с наклоном в 30° , а второе правее его.

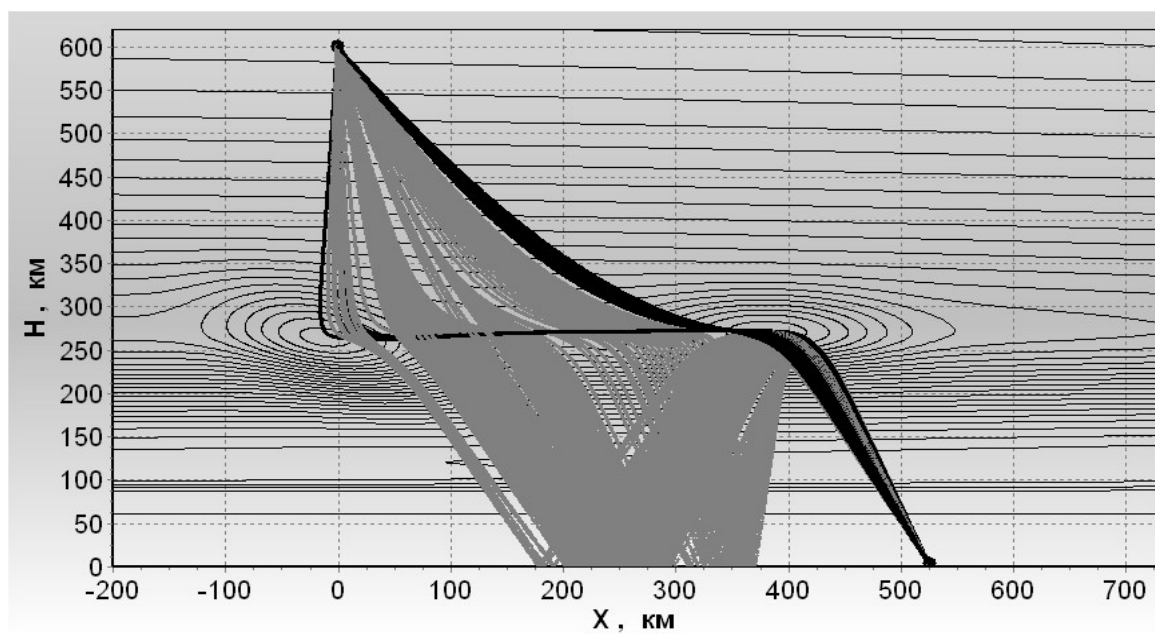


Рисунок 5.5 - Совокупность траектории лучей, дающих вклад в транзиограмму: случай двух неоднородностей типа «облако»

Как и ожидалось, наличие двух облаков приводит к появлению дополнительных следов на транзиограммах. Отличием от случая одной неоднородности является появление 4 типов транзиограмм, последовательно показанных на рисунке 5.6.

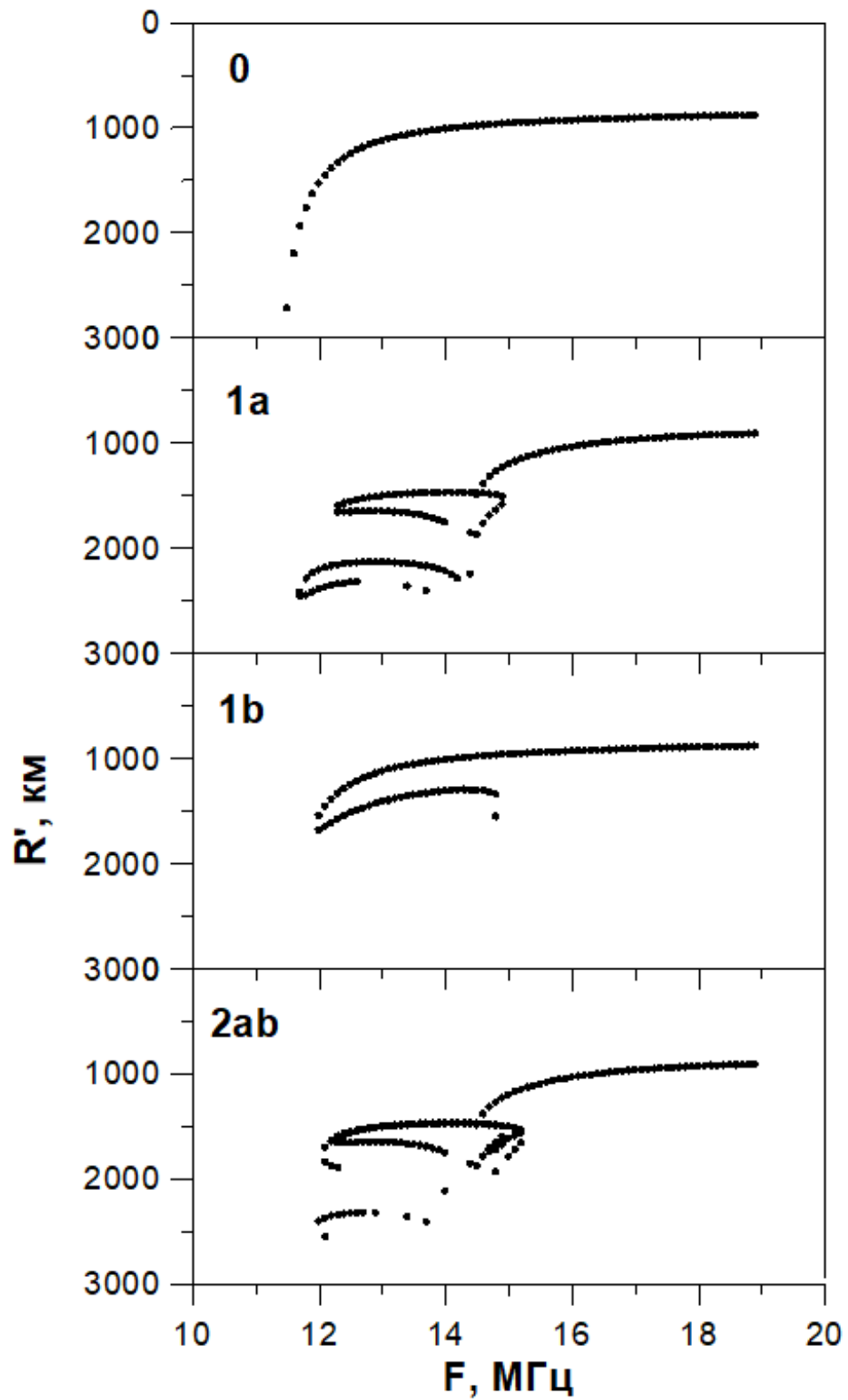


Рисунок 5.6 - Последовательность транзионограмм, обусловленная присутствием двух облаков. Для сравнения представлены следующие ситуации: 1) отсутствие неоднородностей (график 0), 2) присутствие правого облака (график 1a), 3) присутствие левого облака (график 1b), 4) присутствуют оба облака (график 2ab)

Некоторые особенности трансionoграмм в зависимости от частоты заключаются в следующем: 1) совпадение случаев 0 и 1b, 1a и 2ab, 2) основной вклад в трансionoграмму 2ab вносит неоднородность 1a на высоких частотах, 3) дополнительные следы на низких частотах, 4) даже одиночная трансionoграмма позволяет выявить присутствие неоднородностей.

5.2.2. Оценка неоднородностей по серии последовательных ионограмм ТИЗ.

Выявленная связь характеристик неоднородностей и трансionoграммам позволяет поставить обратную задачу: определение характеристик неоднородностей по серии последовательных трансionoграмм. При этом соотношение между скоростями спутника и неоднородностей позволяет принять упрощающее допущение об учете движения только спутника.

Для расчетов приняли следующие параметры неоднородности, полученные из эксперимента: контрастность $dN/N=50\%$, характерные размеры порядка 50 км, расстояние от станции $X=200$ км. Распределение плазменной частоты для этого случая показано на рисунке 5.2a. Задаем высоту спутника 600 км и снимаем серию последовательных ионограмм, моделирующих его движение с шагом 200 км. Результаты приведены на рисунке 5.7a (в реальных условиях шаг между ионограммами может уменьшаться до 50 км).

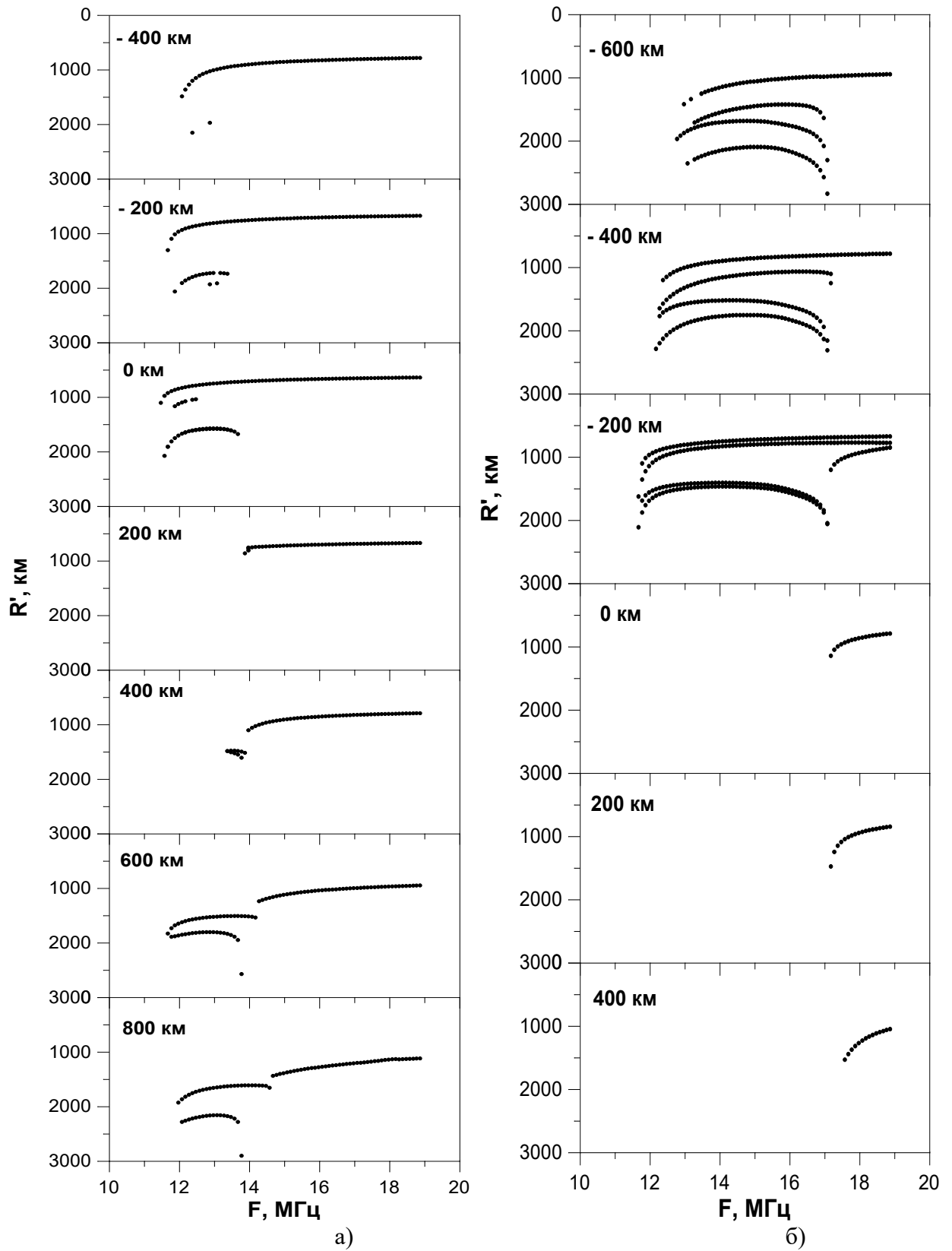


Рисунок 5.7 - Серия последовательных ионограмм (положение спутника относительно станции указано на графиках) для случая одной неоднородности типа (а) «облако» и (б) «ступенька»

Из анализа серии трансionoграмм видно, что цикл движения спутника над облаком, занимающий более 1000 км пролета над наземной станцией, может включать несколько периодов, отличающихся силой влияния: 1) появление «облака» и начало, 2) усиление, 3) максимальное воздействие, 4) ослабление.

Аналогичная ситуация для «ступеньки» представлена на рисунке 5.7б.

Эта серия трансionoграмм показывает, что по форме трансionoграмм можно отличить вид неоднородности.

5.2.3. Общий случай расположения объектов

Для обобщения результатов интересно было рассмотреть случай «облака», удаленного от выделенной в предыдущих случаях плоскости. В этом случае граничная задача принимает вид (рисунок 5.1) и двумерное приближение становится неприменимым. Для поиска отражений необходимо использовать численные методы решения и разнообразные наборы начальных условий. При этом выбрана модель, использованная при расчете рисунка 5.4в, но расположив центр неоднородности на расстоянии 150 км от выбранной плоскости.

Результат моделирования ионограммы представлен на рисунке 5.8. Рисунок 5.8а иллюстрирует траектории радиоволн в проекции на горизонтальную плоскость для частоты 12 МГц.

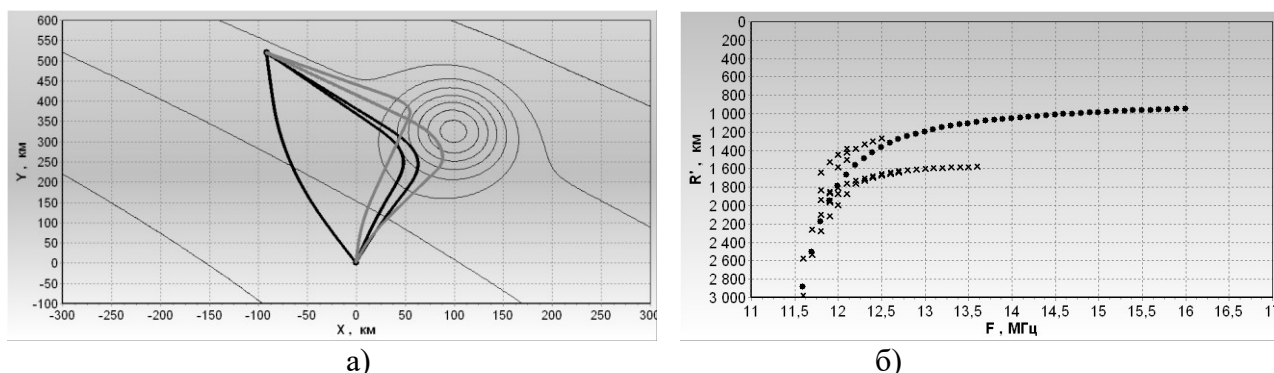


Рисунок 5.8 - Результаты для случая одного облака в стороне от плоскости «спутник-приемник»: (а) траектории радиоволн, для которых соответствующие точки на трансionoграмме показаны черными кружками (без отражения от Земли), серые кресты соответствуют наличию одного отражения от Земли, (б) соответствующая трансionoграмма

Трансionoграмма на рисунке 5.8б состоит из двух независимых частей: одна образована лучами с траекториями вблизи выделенной плоскости (кружки) и не связана с отражением от неоднородности в отличие от второй, которая связана с отражением от неоднородности и позволяет диагностировать ее наличие.

Необходимо отметить, что результаты этого раздела получены в результате работы по

подготовке к будущим экспериментам по ТИЗ (например, с использованием космической группировки «Ионосфера-М»). С этой целью можно будет использовать полученные результаты:

- дополнительные треки, присутствующие в результате отражения от Земли, позволяют детектировать ионосферные неоднородности в пределах контрастности и масштабов, рассмотренных в данной работе;
- трансionoграммы, полученные в дополнение к ионограммам ВЗ и ВнЗ, существенно улучшающие знание пространственной структуры ионосферы;
- моделирование последовательности трансionoграмм, позволяющее выделить одну или несколько неоднородностей.

5.3. Диагностика ионосферы с использованием двух КА.

Многочисленные эксперименты доказали, что спутниковое зондирование позволяет осуществлять диагностику ионосферы с любых высот орбит ИСЗ, в том числе, и с высот обитаемых космических станций [196]. Поэтому в зависимости от конкретных задач высоты ИСЗ могут сильно различаться. Могут играть роль и такие факторы, как удобство получения информации на земле, тщательный обзор некоторых регионов, пространственное распределение электронов вблизи максимума ионосферы.

В связи с развитием (процесса) освоения космоса и постоянным увеличением числа действующих спутников большой интерес представляет задача исследования возможностей диагностики ионосферы с использованием только двух ИСЗ без привлечения наземных пунктов наблюдения.

В настоящем разделе будут рассмотрены возможности изучения ионосферы с помощью ионограмм типа «спутник-спутник» в случае, если оба спутника находятся на низких орбитах (например, МКС и КА «Прогресс-М»), а также в случае, если они находятся на разнорысоких орбитах.

5.3.1. На основе приемника на МКС и бортового ионозонда на КА «Прогресс-М»

Для глобального мониторинга ионосферы предпочтительно размещать бортовые ионозонды на обитаемых станциях из-за возможности обслуживания работающей аппаратуры – ее ремонта, замены блоков питания и т.д.

Однако важной особенностью являются также ограничения на постановку на МКС приборов с излучением радиоволн. Таким образом, возможности поставить российский ионозонд на МКС, даже в российский сегмент (как это было на станции МИР) уже не будет.

Однако поставить только приемную часть ионозонда, чтобы использовать для обратного трансionoсферного радиозондирования (ОТИЗ), а также в качестве радиоспектрометра, видимо, будет возможно. Отметим, что при этом трансionoграммы ОТИЗ будут приниматься от всех российских ионозондов, попадающих в орбиту (вернее, под орбиту) спутника и обеспечивать радиопрогноз над всей страной. Также в этом случае может регистрироваться критическая частота в максимуме ионосферы [197].

С этой точки зрения представляется целесообразным рассмотреть возможности использования международной космической станции (МКС) и космических аппаратов (КА), которые регулярно посещают станцию, доставляя на неё сменные экипажи, продовольствие, аппаратуру и т.п. Сейчас таким КА-ом является «Прогресс-М».

«Прогресс-М» имеет три основных отсека: герметичный грузовой со стыковочным агрегатом, где размещались материалы и оборудование, доставляемые на станцию МКС; отсек компонентов дозаправки, сделанный негерметичным, чтобы защитить станцию в случае утечки токсичного топлива; а также приборно-агрегатный отсек. В последнее время этот отсек стал использоваться в качестве лабораторий различного назначения. Именно в нем и предлагается разместить бортовой ионозонд. При этом антенны ионозонда будут прикрепляться к внешней стороне КА «Прогресс-М», а после выполнения основной миссии разворачиваться в нормальные дипольные антенны автоматически по радиокоманде.

Если два КА находятся выше и ниже максимума ионосферы, можно получить трансionoграммы между двумя спутниками (ТИЗ 2С), например, между МКС и КА «Прогресс-М».

С точки зрения наиболее приближенного к реальному определению пространственной структуры ионосферы следует использовать все возможные траектории между наземными и спутниковыми ионозондами. Предлагается расположить бортовой ионозонд на грузовике, а ионозонд без передатчика - на МКС.

На первом этапе эксперимента реализуются следующие линии радиозондирования: внешнее с КА «Прогресс-М», синхронизированное с наземными станциями «Парус-А», автоматически приводящими к получению трансionoграм ТИЗ и ОТИЗ; ТИЗ 2С с излучением с грузовика и приемом на МКС для отладки линий ОТИЗ между российскими станциями «Парус-А» и МКС в дополнение к получению новой и наиболее точной информации о распределении электронов вблизи максимума ионосферы. В течение полугода планируется медленное уменьшение высоты КА «Прогресс-М» и получение ЗНС-ионограмм [198,199]. Такой эксперимент для высот грузовика ниже 330 км будет планироваться впервые.

После окончания работы КА «Прогресс-М» линии ОТИЗ между Землей и МКС продолжают работать (это можно считать вторым этапом) и обеспечивать данные по

концентрации электронов в максимуме ионосферы.

Предварительное математическое моделирование первого этапа предлагаемого эксперимента показало результаты, представленные на трех последующих рисунках для разных входных параметров. Используется расчет без учета магнитного поля. На них цифрами обозначены семейства траекторий однотипных лучей и соответствующие им следы на ионограммах

На рисунке 5.9 представлен случай небольшого расстояния между двумя аппаратами.

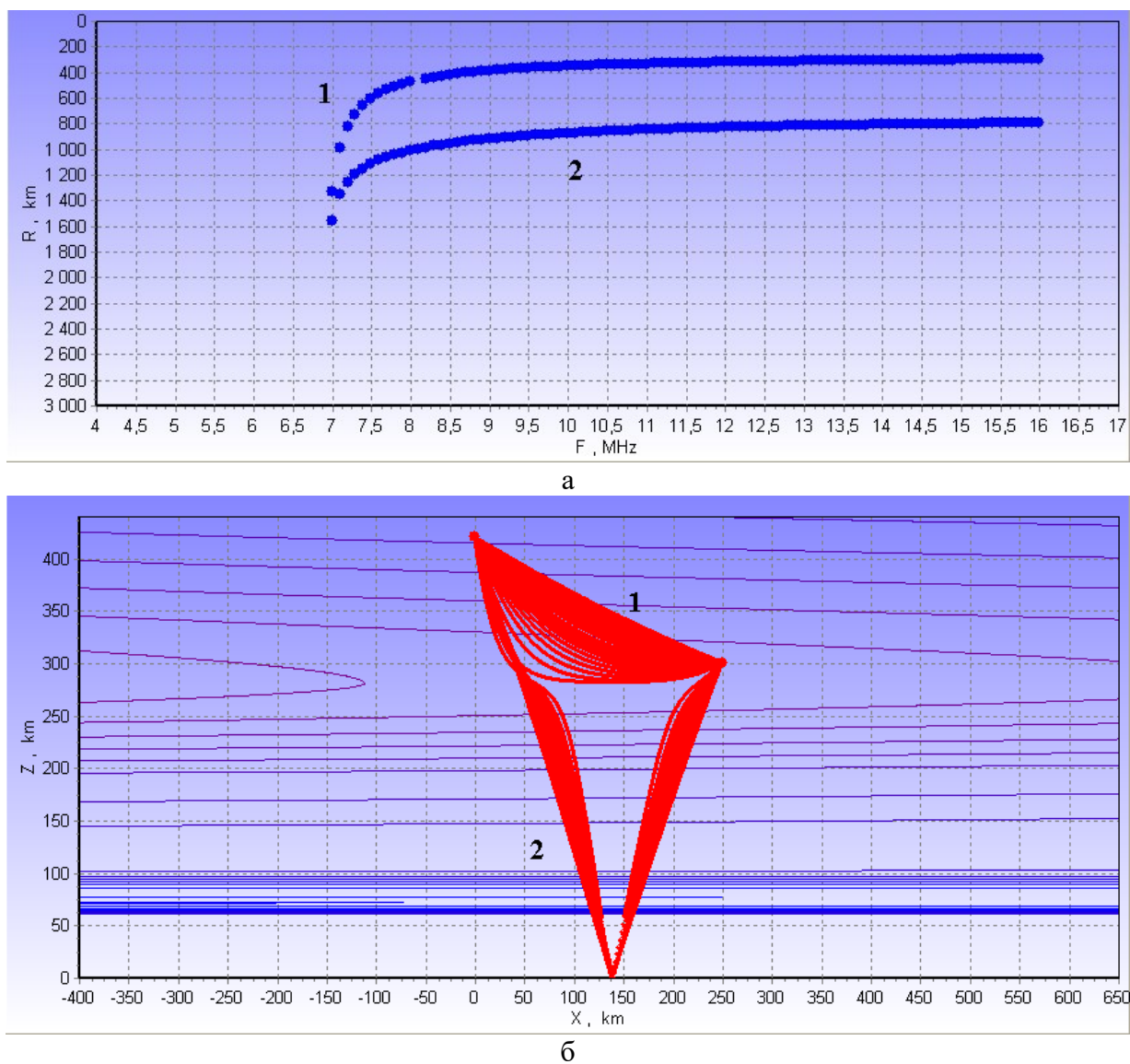
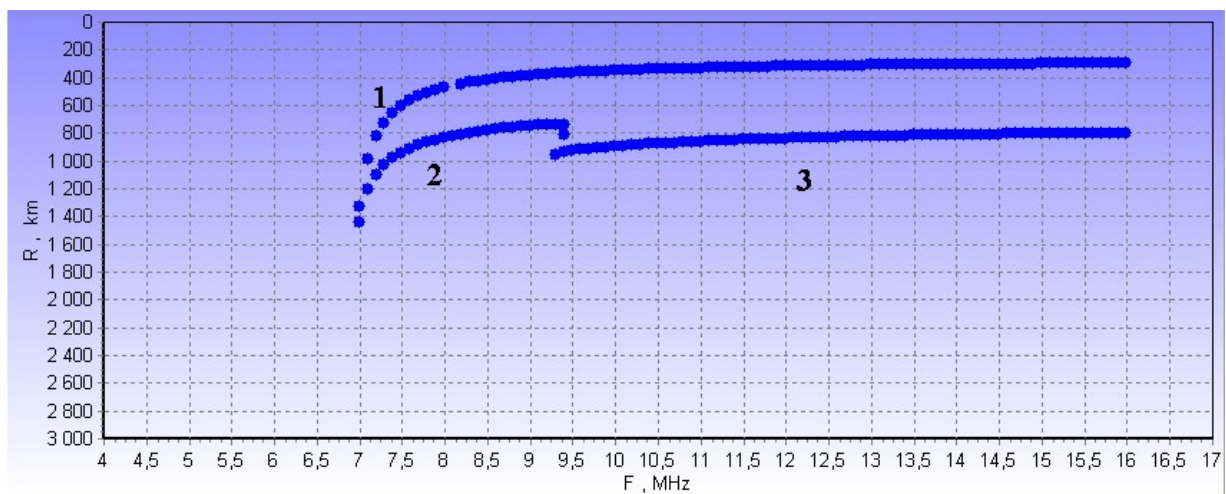
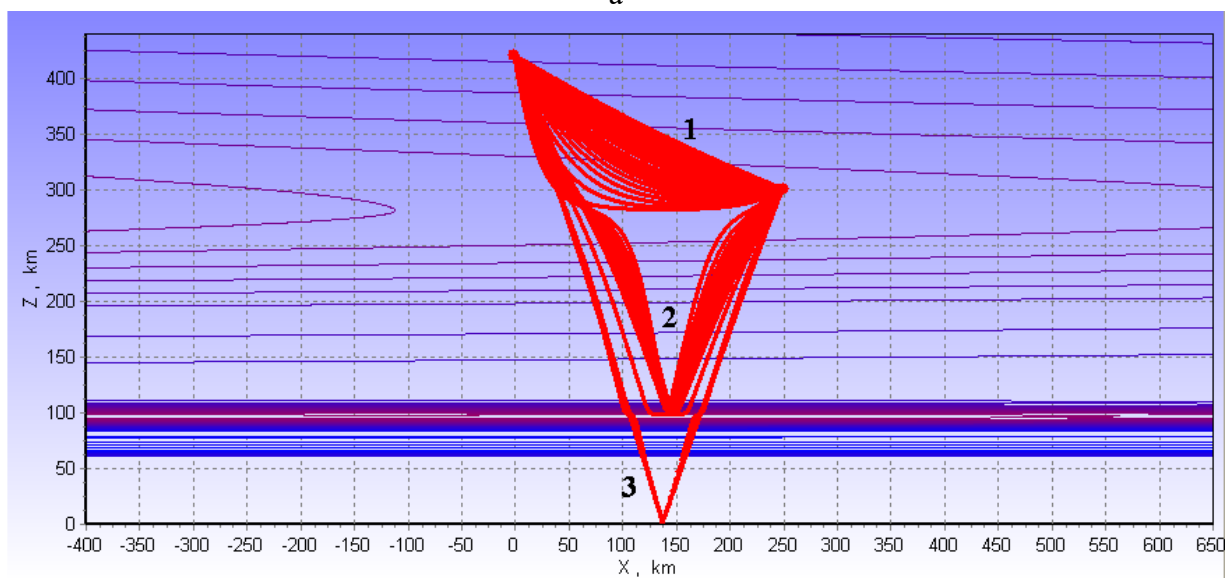


Рисунок 5.9 - Трансионограмма (а) и соответствующие траектории (б) проходящих через ионосферу радиолучей

На рисунке 5.10 представлены результаты аналогичного расчета, но уже при наличии спорадического слоя Es. Траектории, отраженные от него, и соответствующий им след обозначен цифрой «2».



а



б

Рисунок 5.10 - Трансионограмма (а) и соответствующие траектории проходящих через ионосферу радиолучей (б) при наличии спорадического слоя Es

Из рисунка 5.10 видно, что кроме $foF2$ и $hmF2$ можно также определять предельную частоту спорадического слоя Es.

Далее, на рисунке 5.11 дополнительно вводится достаточно мощная одиночная ионосферная неоднородность с $dN_e=70\%$, расположенная под МКС.

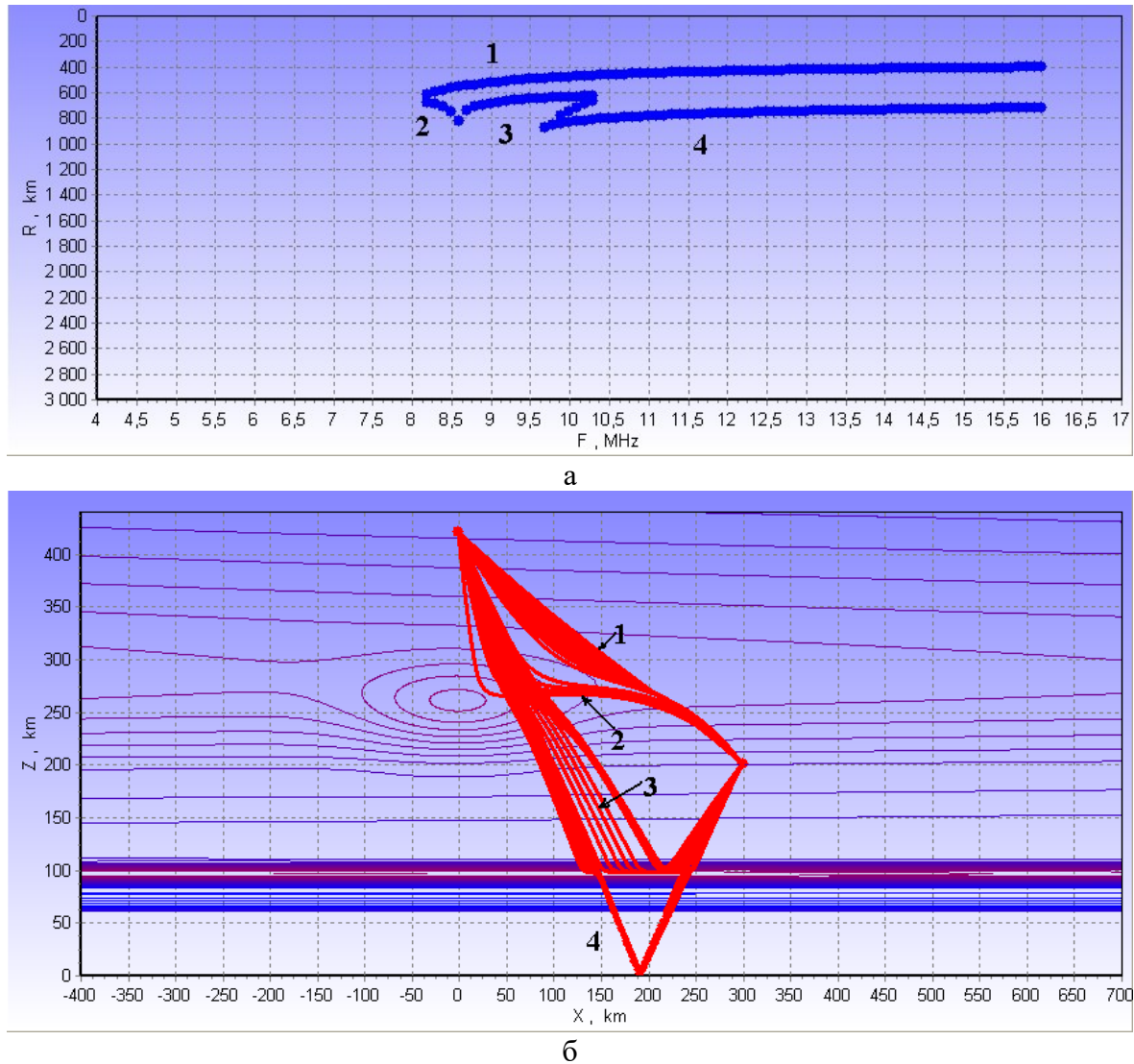


Рисунок 5.11 - Трансионограмма (а) и соответствующие траектории проходящих через ионосферу радиолучей (б) при наличии спорадического слоя Es и одиночной ионосферной неоднородности

Исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

- Результатом первого этапа является определение всех классических параметров ионосферы с грузового КА «Прогресс-М». Второй КА позволяет дополнительно определять:
 - $foF2$ и, возможно, $hmF2$.
 - Предельную частоту $foEs$ и степень его "прозрачности", если есть Es.
 - Факт наличия неоднородностей, а, возможно, их параметры.
- Результатом второго этапа являются $NmF2$ и $hmF2$ на площади с диаметром свыше 4000 км около каждой ионосферной станции, что существенно превышает диаметр ВЗ (~200 -250 км).

5.3.2. Трансионосферное радиозондирование в Арктике в присутствии нескольких бортовых ионозондов на разновысоких орбитах

Интерес к району Арктики возрастает с каждым годом, требуя оперативного мониторинга ионосферы для целей КВ-радиосвязи. С другой стороны, нужно отметить, что арктический регион наименее изучен из-за трудностей различного типа. Одна из них заключается в возможности использования только высокоэллиптических спутников (ВЭС), другая – в необходимости использования комплексов спутников на разных орбитах, обеспечивающей трассы внешнего и трансионосферного радиозондирования.

Возможная предлагаемая схема арктического мониторинга показана на рисунке 5.12. Она включает два высокоэллиптических космических аппарата (КА), несколько КА на круговых орбитах ($h \sim 600 - 2000$ км). Все КА снабжены ионозондами. В принципе, эта схема обладает эффективностью при решении любых задач, однако с самого начала предлагается более простая и дешевая схема, в которой на высоких орбитах используются только передатчики, а на низких орбитах только приемники.

Тогда при излучении с ВЭС и приеме на земле получаем режим прямого трансионосферного радиозондирования в диапазоне 1-30 МГц.

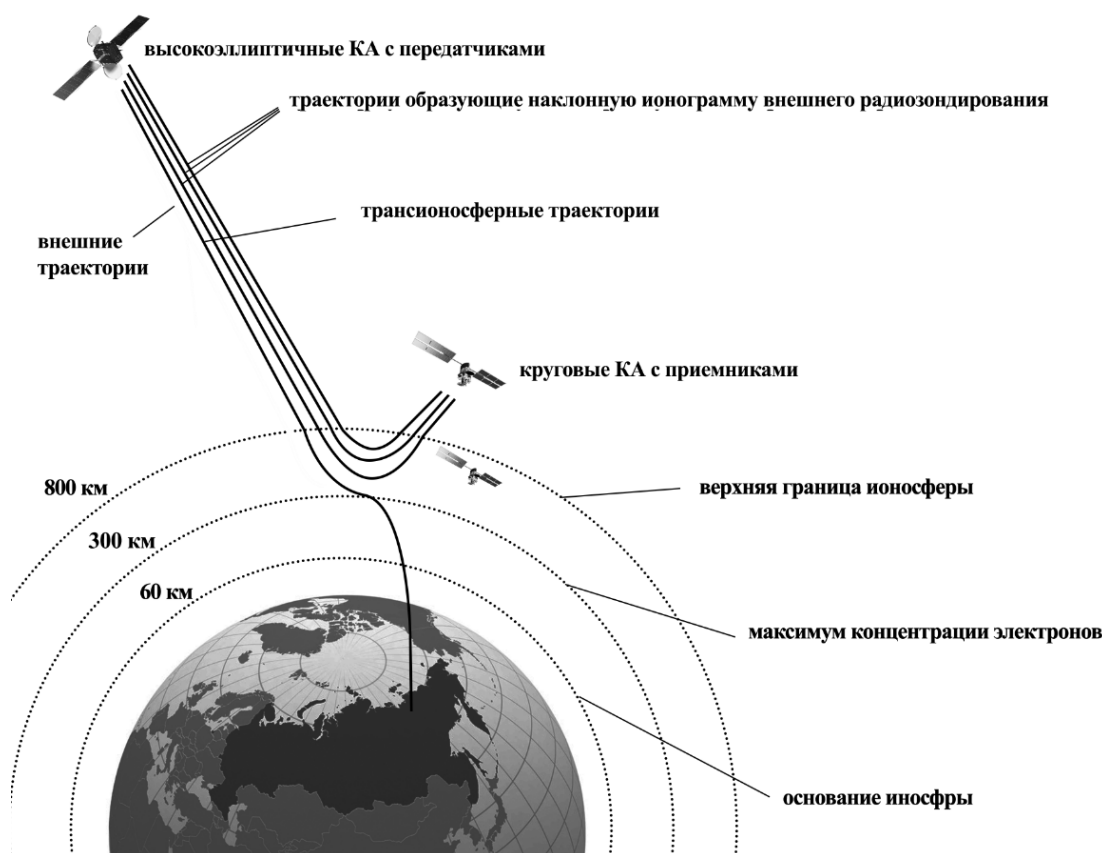


Рисунок 5.12 - Схема мониторинга арктической зоны системой нескольких спутников в режиме внешнего и трансионосферного зондирования

Численный эксперимент

В предыдущем разделе был предложен вариант простого и дешевого космического эксперимента, который позволит осуществлять мониторинг главных структур арктической зоны (полярной шапки, овала, провала и других). Предложенный вариант основан на прямом зондировании, но возможно и обратное расположение трасс.

Для проведения численного эксперимента выбран сеанс 21.02.2014 г., UT 2 ч. 0 м. Для координат ВЭС выбраны: широта $61,97^\circ$, долгота $0,13^\circ$ и высота 38955 км, для низколетящего спутника эти значения равны $79,56^\circ$, $50,8^\circ$, 600 км. Ионосфера задавалась моделью SIMP-1.

Рисунок 5.13 показывает результаты численного эксперимента в виде трех графиков, которые содержат: траектории лучей (а), трансionoграммы (б) и дополнительно пространственное ослабление лучей (в).

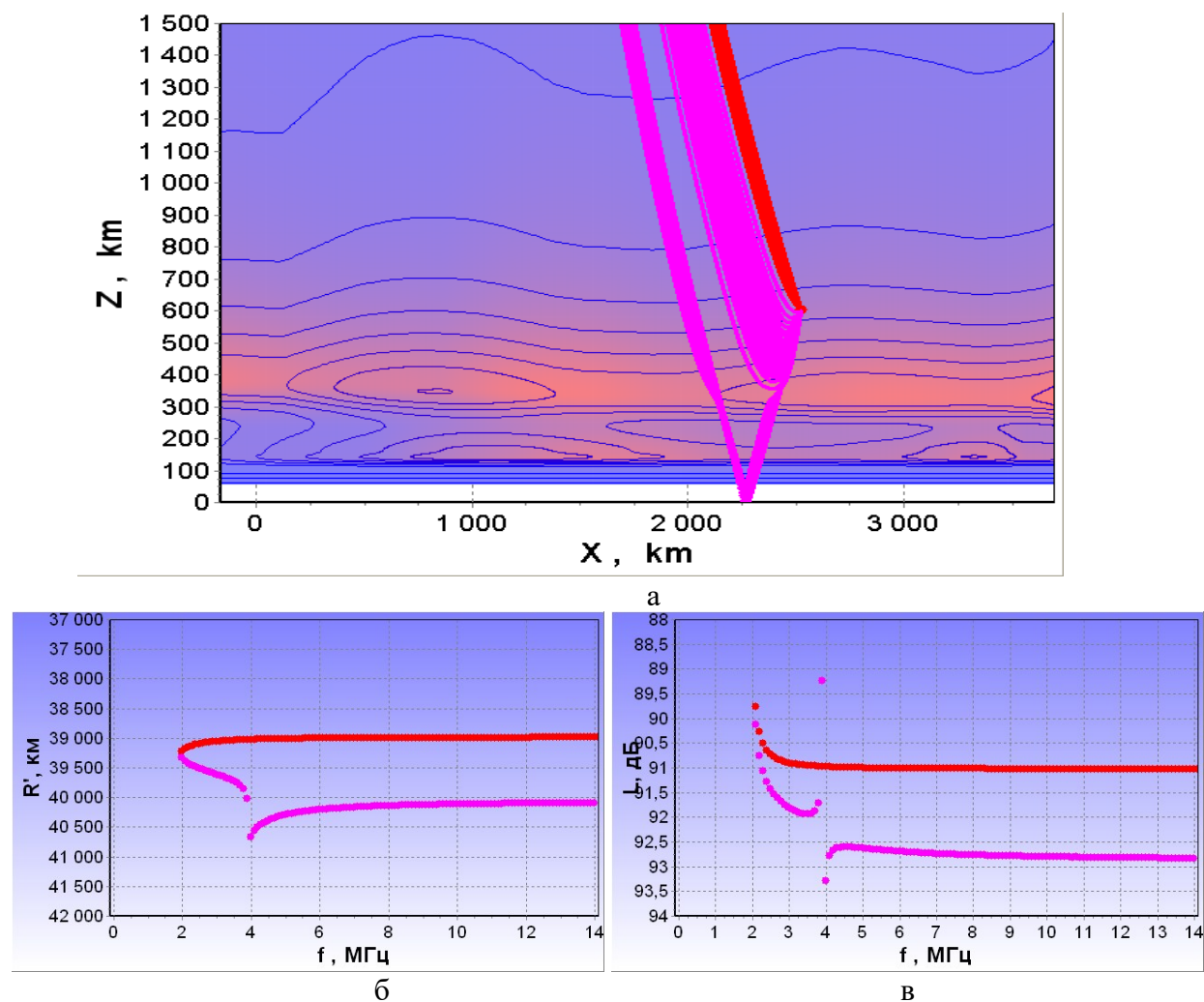


Рисунок 5.13 - Реализация схемы мониторинга, включающей два спутника ВЭС и КНЧ: (а) пространственное распределение плазменных частот и траектории, (б) трансionoграммы, (в) пространственное ослабление лучей

Результаты сводятся к следующему: 1) в спокойных условиях хорошо определяется критическая частота под приемным спутником, 2) на высоте низколетящего спутника определяется плазменная частота, 3) расчет энергетических характеристик показал малую разницу ослабления между прямым и отраженным лучами (несколько дБ). Тем самым, рисунок 5.13 показал возможность использования внешнего зондирования ионосферы в Арктике. Следующий случай показывает возможность использования трансionoсферного зондирования на примере характерной особенности распределения авроральной плазмы - стенки ионизации. Получили, что при излучении с высот порядка 10000, 20000 и 30000 км сигналы будут выходить в район северных станций.

Рисунок 5.14 показывает траектории волн, излученных на высоте 32701 км.

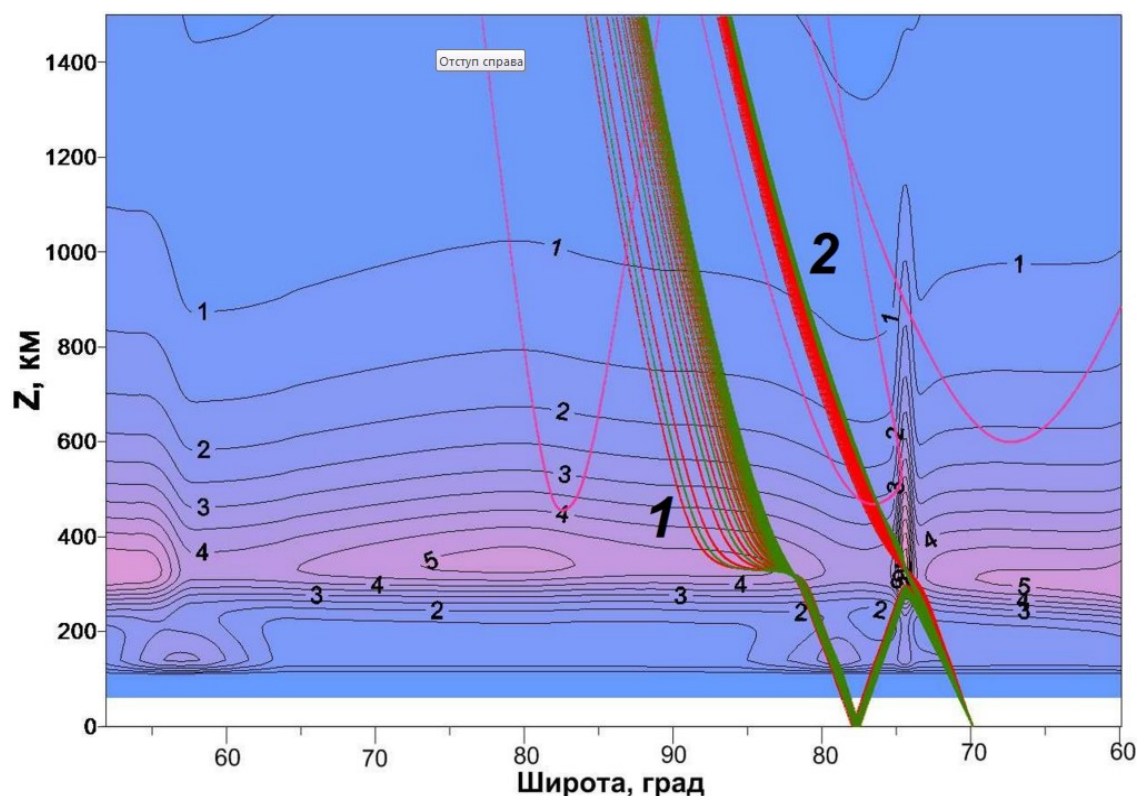


Рисунок 5.14 - Траектории лучей, излученных на высоте 32701 км, на фоне распределения со стенкой ионизации: о-лучи (красные линии), х-лучи (зеленые линии)

Продолжили эксперимент выбором 5 точек на траектории спутника «Ионосфера-М» через 2 часа. Из реального эксперимента определили неоднородность типа стенки и расположили ее на 500 км севернее станции. Рисунок 5.15 показывает трансionoгамму, на которой в результате появился второй веер лучей, отраженных от стенки и от Земли и содержащих информацию о неоднородности и плазме окружающего пространства.

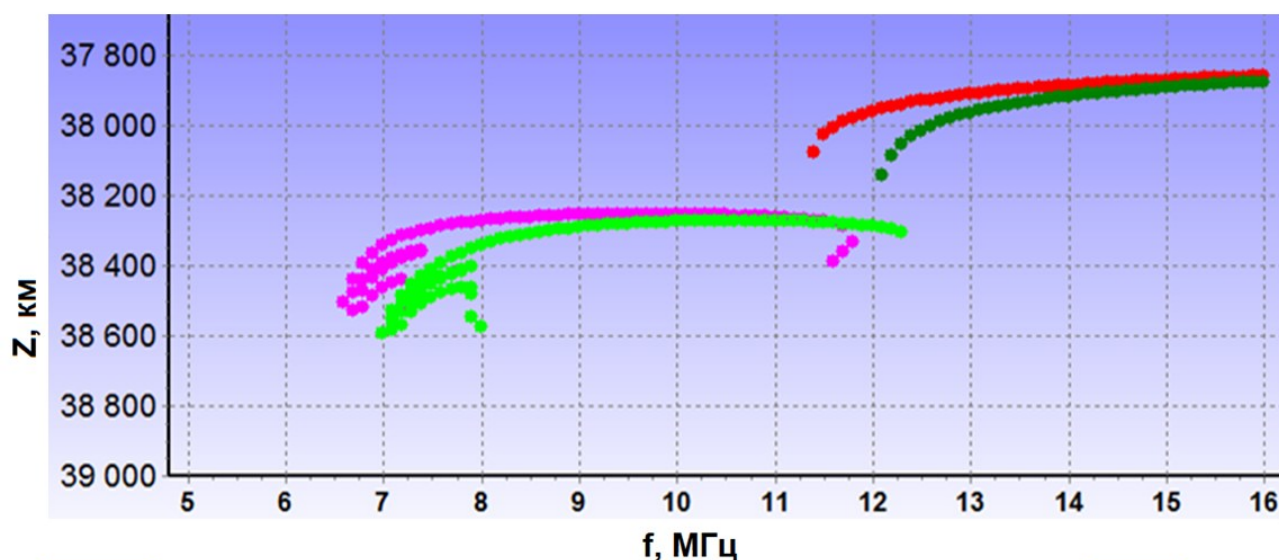


Рисунок 5.15 - Трансионограмма, образованная лучами рисунка 5.14, распространяющимися в ионосферной плазме со стенкой ионизации

Выводы раздела:

- По данным ТИЗ с ВЭС и ВНЗ уверенно отождествляется наличие плазменной стенки.
- При ВЭС надежно наблюдаются следы, связанные с наличием стенки.
- Данные ТИЗ с ВЭС могут быть основой модификации модели распределения авроральной ионизации.

5.4. Влияние ионосферы на точность работы спутниковых навигационных систем

Спутниковые системы позиционирования широко используются в различных целях (транспорт, геодезия, сейсмика, картография и др.) и требования к таким системам постоянно возрастают. Причины, вызывающие ошибки в определении координат, можно условно разделить на технические (погрешность в определении траектории, рассинхронизация часов спутника и приемника, геометрия расположения спутников и др.) и физические (ионосферные и тропосферные задержки, отражение сигнала от препятствий).

Основной причиной системных ошибок является влияние ионосферы (через задержку сигналов). Это влияние можно ослабить расчетом ионосферной задержки с помощью ионосферной модели, например, широко используемой «модели Клобучара» [198], уменьшающей влияние ионосферы на ~50% [200]. Однако развиваются и новые методы на основе траекторных расчетов и коррекции ионосферных моделей [201].

В данном разделе используется модель ионосферы, приближенная к реальным условиям, для оценки влияния ионосферы на траектории радиоволн, величину ионосферной

задержки и точность определения местонахождения. Отличием от других работ является учет неоднородностей различных масштабов.

Основные результаты данного раздела представлены в [199, 202, 203].

5.4.1. Среда распространения и методика расчетов

Для моделирования процесса определения положения с помощью навигационных сигналов был выбран вариант использования стандартного бытового одночастотного приемника GPS, работающего на частоте 1575,42 МГц. Метод позиционирования в нем заключается в следующем. В зоне видимости GPS приемника постоянно находятся не менее трех-четырёх спутников с известным положением. Расстояние до каждого спутника вычисляется по времени и скорости распространения сигнала. Данные о положении спутников вместе с измеренными расстояниями позволяют определить местоположение приемника.

Для вычисления этого расстояния необходимо решить граничную задачу, которая сводится к поиску полярного и азимутального (Δ_0, α_0) углов, при которых траектория луча проходит через точку приема (θ_1, φ_1). Для трехмерно-неоднородной среды получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \theta(f, \Delta_0, \alpha_0) = \theta_1 \\ \varphi(f, \Delta_0, \alpha_0) = \varphi_1 \end{cases}, \quad (5.2)$$

где f – рабочая частота. Решение (5.2) находится численно.

Позиционирование наземного приемника осуществлялось путем численного решения задачи минимизации функции нескольких переменных

$$F(x, y, z) = \sum_{i=1}^n \left\langle \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} - R_i \right\rangle^2, \quad (5.3)$$

где n – число спутников, (x_i, y_i, z_i) – их положение в пространстве, R_i – рассчитанный групповой путь, (x, y, z) – искомые координаты приемника.

Одновременно с этим рассчитывалась величина непосредственно ионосферной задержки (разница между значением группового пути луча и расстоянием между спутником и приемником).

Факторами, определяющими точность расчетов, являются наиболее оптимальная методика расчетов траекторий и модель ионосферы. В данном случае расчет траекторий будет выполняться только численными методами, в частности, методом характеристик в рамках геометрооптического приближения.

Дополнительные исследования показали, что для используемой частоты 1575,42 МГц

разница в действующем расстоянии (групповом пути луча) между обыкновенной и необыкновенной компонентами составляет менее 2 см. Поэтому в дальнейших расчетах мы ограничимся только о-компонентой или изотропным вариантом среды. Дополнительно можно отметить, что результаты расчетов, полученные в приближении изотропного распространения, обычно тоже попадают в указанный интервал. Это позволит использовать данное приближение без потери точности.

Другим важным фактором, влияющим на качество моделирования распространения сигнала на трассе «навигационный спутник – наземный приемник», является выбор среды распространения – в нашем случае модели ионосферы.

Модель должна позволять определять электронную концентрацию до высот спутников (≥ 20000 км). Поскольку все существующие эмпирические модели (IRI, NeQuick, SIMP, IRI-Plas и др.) являются медианными, для их использования в режиме реального времени необходимо иметь возможность их коррекции.

Поэтому сравнение будет проводиться по двум критериям: 1) качество описания верхней ионосферы ($h > h_m F_2$), 2) наличие параметров, доступных для коррекции.

Будут сравниваться следующие модели:

- IRI-2016 [164];
- IRI-Plas [204,205];
- NeQuick [83,84];
- составная SIMP [85,86];
- комбинированная модель, соединяющая в себе преимущества и нивелирующая недостатки базовых моделей.

В результате анализа в качестве модели была выбрана комбинированная модель с нижней частью по IRI-2016, а верхней частью – по NeQuick. Сшивка проводится на высоте 2000 км по значению плазменной частоты, полученной из IRI-2016. Такая модель позволяет, с одной стороны, максимально использовать возможности коррекции, а с другой – качественно описывает электронную концентрацию на больших высотах. На рисунке 5.16 синим цветом показан вертикальный профиль электронной концентрации, рассчитанный по ней в данной точке в заданное время.

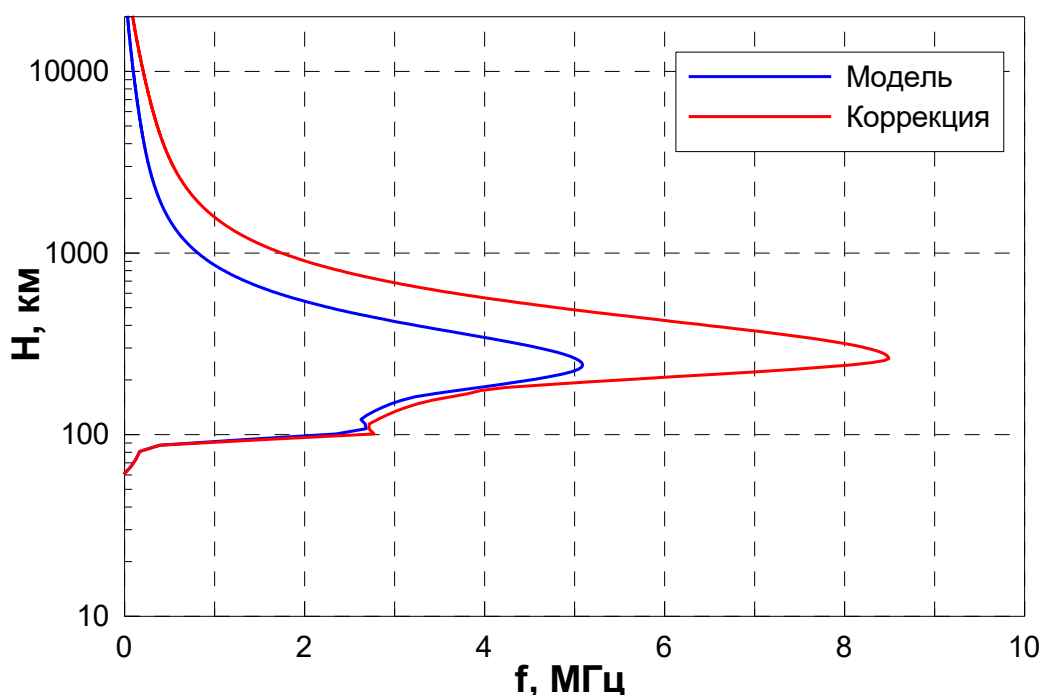


Рисунок 5.16 - Сравнение профилей электронной концентрации в п. Москва (55.5° N, 37.3° E) для сеанса 02.12.2014 в 11.01 UT: синяя линия показывает исходный модельный профиль, красная линия – профиль, скорректированный по значениям основных параметров, полученных из экспериментальной ионограммы вертикального зондирования

Далее проводится коррекция вертикального профиля по экспериментальным данным, заключающаяся в следующем. В модели IRI-2016 выбирается опция ручного задания параметров и подставляются значения, полученные по результатам обработки ионограммы DPS-4 (в нашем случае это значения f_oF2 , H_mF2 , а также параметры $B0$ и $B1$). Полученный скорректированный модельный профиль максимально соответствует реальному. В случае отсутствия значений параметров $B0$ и $B1$ для их нахождения используем методику, разработанную в [206]. На рисунке 5.16 полученный скорректированный профиль отображен красным цветом. Для большей наглядности ось высот приведена в логарифмическом формате.

Из рисунка 5.16 можно сделать вывод, что даже современные модели не всегда правильно описывают мгновенное состояние ионосферы. Процедура коррекции позволяет достигать более точного соответствия, позволяющего рассчитывать ионосферные задержки сигнала, наиболее соответствующие реальным.

Для моделирования распространения радиоволн на каждом шаге расчета необходимо вычислять значение электронной концентрации в текущей точке и, как минимум, ее первые производные. Наиболее простой способ – каждый раз вызывать IRI-модуль и находить значение N_e , а производные искать численно. Но это приводит к большим временным затратам, и скорость расчетов резко падает.

Поэтому мы используется следующий вариант. С некоторым шагом (в нашем случае 1 град по широте и долготе и 8 км по высоте) задаем трехмерную решетку (ее точки называют узловыми). Потом по используемой модели насчитывается массив значений электронной концентрации в этих точках и для нахождения концентрации в произвольной точке используется интерполяция кубическими сплайнами (см., например, [92]).

В случае применения этого подхода скорость резко возрастает, чем и обусловлена возможность приемлемого времени расчета одной траектории.

Методика коррекции пространственно-неоднородной ионосферы по экспериментальным данным вертикального зондирования подробно описана в [115,187] и заключается в использовании вместо абсолютных значений ионосферных параметров коэффициентов, отражающих отношение экспериментальных значений к модельным. Это отношение является функцией координат и обладает большей гладкостью, чем для самих параметров (например, $foF2$ или $hmF2$), расширяя пространственную область применения скорректированной модели. Кроме того, если учесть, что основная часть ионосферной задержки приходится на высоты ионосферы вблизи $hmF2$, а искомые лучи пересекают ее вблизи приемника, то коррекция по данным одного ионозонда вполне достаточна для наших целей.

Влияние на распространение навигационных сигналов неоднородных структур ионосферы, как и выше, описывается путем учета двух основных типов неоднородностей: одиночные крупномасштабные и перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), расположенные на пути прохождения луча.

5.4.2. Моделирование определения положения по данным навигационных спутников

В этом разделе задача состоит в определении положения GPS-приемника по данным навигационных спутников и расчете погрешности. Для конкретизации использовались данные по четырем спутникам, находящимся достаточно высоко над горизонтом и по обе стороны от точки приема (положение №1), что является одним из условий наиболее точной работы реальных приемников GPS. Высота спутников задавалась 20000 км.

Моделирование началось с условий состояния ионосферы, рассчитанных по исходной модели для сеанса 02.12.2014 в 11.01 UT. Рисунок 5.17а показывает взаимное расположение спутников (черные точки) и GPS-приемника (красная точка). Также на нем приведены двумерный профиль электронной концентрации в горизонтальной плоскости на фиксированной высоте и четыре проекции траекторий распространения на эту плоскость. На рисунке 5.17б дана траектория распространения сигнала для спутника с координатами (48.75 с.ш., 87.61 в.д.) на ее нижнем участке (ниже 1500 км).

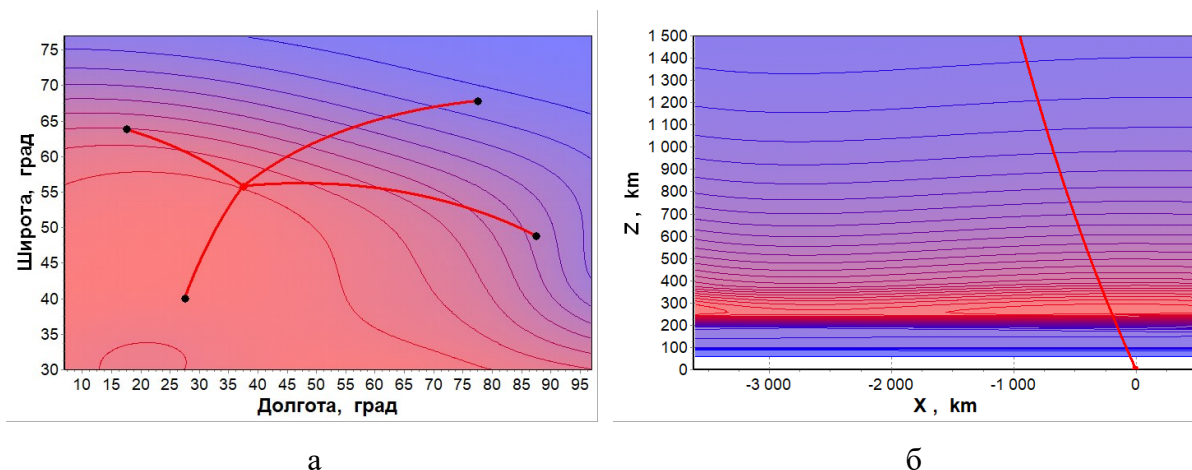


Рисунок 5.17 - Положение №1. а) – взаимное расположение спутников и GPS-приемника в задаче о позиционировании на фоне пространственного распределения электронной концентрации на высоте $h_m F_2 = 260$ км, также даны проекции траекторий распространения на эту плоскость; б) траектория распространения сигнала для спутника с координатами (48.75° с.ш., 87.61° в.д.)

Проведенная далее коррекция модели по экспериментальным данным позволила использовать скорректированную модель для исследования влияния возмущенной ионосферы на результаты позиционирования.

Случай рисунка 5.18 отличается от рисунка 5.17 присутствием неоднородности.

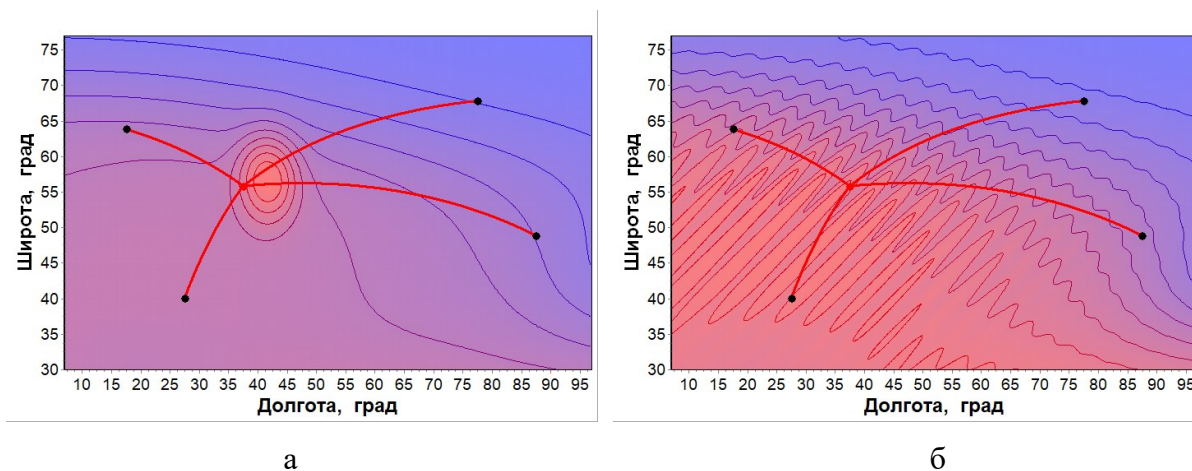


Рисунок 5.18 - Положение №1. То же, что и рисунок 5.17, при наличии одиночной неоднородности (а) и в присутствии ПИВ (б)

Основные результаты, полученные при исследовании степени влияния разных типов ионосферы на данные позиционирования, представлены ниже в таблицах. В таблице 5.1 приведены значения величин непосредственно ионосферной задержки для каждого спутника. В таблице 5.2 представлены величины отклонения рассчитанного положения приемника от истинного, как по каждой координате, так и общее отклонение и значение СКО, полученное при его определении.

В обеих таблицах строки соответствуют следующим ионосферным условиям:

- первая строка – модель по умолчанию без неоднородностей.
- вторая строка – модель после коррекции по данным ионограммы вертикального зондирования без неоднородностей.
- третья строка – модель после коррекции при наличии одиночной крупной неоднородности (рисунок 5.18а);
- четвертая строка – модель после коррекции при наличии ПИВ (рисунок 5.18б) с начальной фазой 0 град (см. (1.50));
- пятая строка – то же, что и четвертая, однако начальная фаза для ПИВ 180 град.

Таблица 5.1. Ионосферная задержка для каждого спутника (положение №1)

Ионосфера	dR ₁ , м	dR ₂ , м	dR ₃ , м	dR ₄ , м
Модель	5,73	5,34	5,51	6,21
Коррекция	12,51	11,65	12,02	13,53
Одиночная неоднородность	15,74	15,01	20,94	26,58
ПИВ (фаза 0 гр)	12,34	12,57	11,74	13,66
ПИВ (фаза 180 гр)	12,68	10,73	12,29	13,49

Таблица 5.2. Отклонения рассчитанного положения от истинного (положение №1)

Ионосфера	dX, м	dY, м	dZ, м	dR, м	СКО, м
Модель	-4,64	-2,27	-4,37	6,77	0,13
Коррекция	-10,01	-4,92	-9,56	14,68	0,27
Одиночная неоднородность	-22,62	0,26	-14,34	26,80	0,52
ПИВ(фаза 0 гр)	-9,26	-4,87	-10,15	14,58	0,66
ПИВ (фаза 180 гр)	-10,93	-4,93	-8,93	14,95	0,11

Для наглядности на рисунке 5.19 приведены рассчитанные отклонения в проекциях на опорные плоскости используемой системы координат в присутствии одиночной неоднородности (ось ОХ направлена на восток, ось ОУ – на север, ось ОZ – вверх). Синими точками показано рассчитанное положение приемника. Реальное положение находится в центре (красные точки).

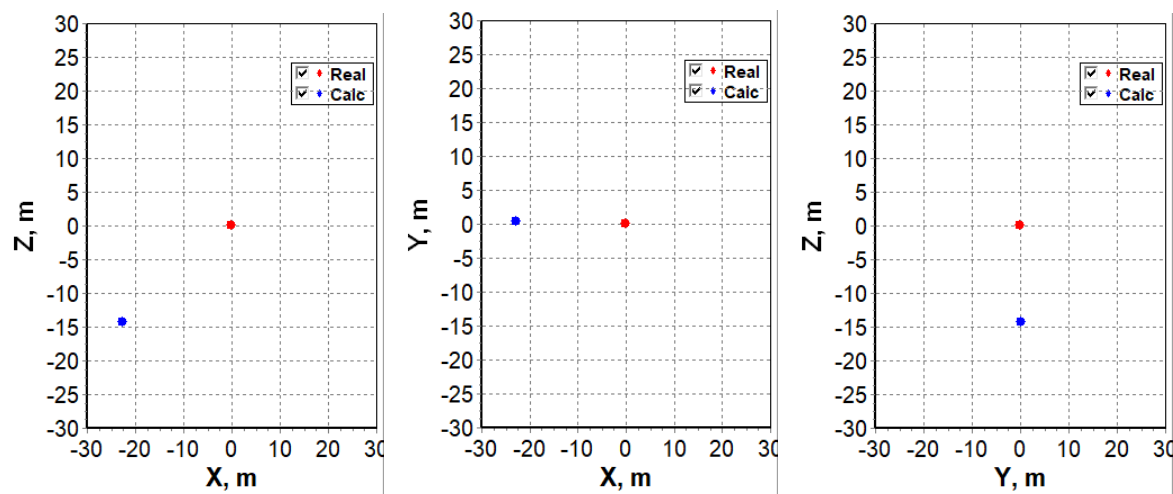


Рисунок 5.19 - Положение №1. Рассчитанные отклонения в проекциях на опорные плоскости используемой системы координат в присутствии одиночной неоднородности. Синие точки – рассчитанное положение приемника, красные – реальное

Далее были проведены аналогичные расчеты для случая, когда все спутники расположены по одну сторону от наблюдателя (положение №2). Такая ситуация встречается достаточно часто и считается одним из факторов, приводящих к понижению точности результатов позиционирования. Взаимное расположение навигационных спутников и GPS-приемника для этого случая показано на рисунке 5.20.

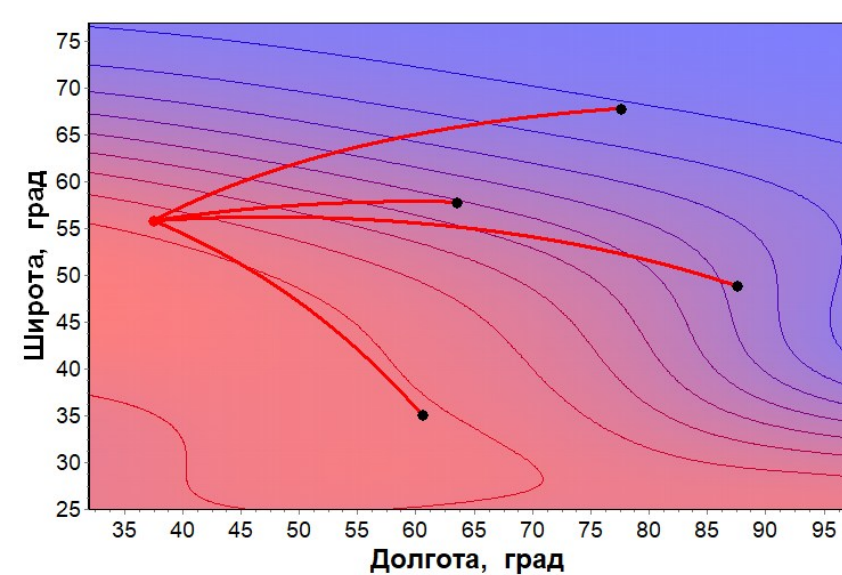


Рисунок 5.20 - Положение №2. Взаимное расположение навигационных спутников (черные точки) и GPS-приемника (красная точка) на фоне пространственного распределения электронной концентрации на высоте $h_m F_2 = 260$ км, также даны проекции траекторий распространения на эту плоскость

Результаты расчетов погрешностей определения местоположения приемного устройства для положения навигационных спутников №2 при различных ионосферных условиях приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3. Отклонения рассчитанного положения от истинного (положение №2)

Ионосфера	dX, м	dY, м	dZ, м	dR, м	СКО, м
Модель	-10,25	7,52	-1,61	12,82	0,25
Коррекция	-22,55	16,59	-3,42	28,21	0,59
Одинокная неоднородность	-36,51	30,90	0,48	47,83	0,29

Сравнение таблиц 5.2 и 5.3 подтверждает предположение о снижении точности при таком расположении спутников и GPS-приемника.

Графически результаты для случая наличия крупномасштабной неоднородности представлены на рисунке 5.21.

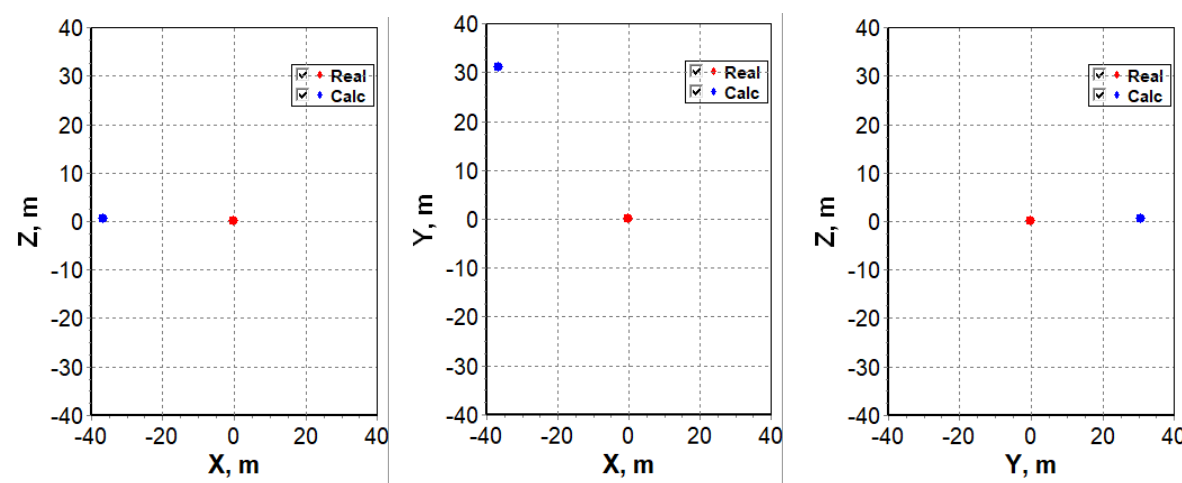


Рисунок 5 - 21. Положение №2. Рассчитанные отклонения в проекциях на опорные плоскости используемой системы координат в присутствии одиночной неоднородности (синие точки) в случае расположения спутников с одной стороны от приемного устройства

Также полученные результаты подтверждают вывод, сделанный ранее, что присутствие крупномасштабных неоднородностей может привести к значительной погрешности в вычислении координат приемного устройства.

Анализируя результаты таблиц 5.2 и 5.3, можно заметить, что присутствие крупномасштабной неоднородности приводит к сдвигу полученного местоположения приемника в сторону, противоположную нахождению самой неоднородности. В то же время возмущения типа ПИВ практически не влияют на конечный результат. Однако, в данном случае может возникнуть «плавающий эффект», когда рассчитанное положение приемника постоянно смещается вблизи некоторой точки. Это связано с тем, что лучи от разных спутников пересекают область максимума ионосферы в условиях несколько пониженной или повышенной концентрации. Причем, с течением времени положение ПИВ смещается, что и

приводит к указанному эффекту.

Полученные результаты показали, что прямое использование современных эмпирических моделей ионосферы в одночастотном GPS-приемнике не всегда может полностью компенсировать ионосферные задержки. Для более качественных результатов необходимо проводить коррекцию по текущим экспериментальным данным. Погрешность в определении положения часто достигает десятков метров.

Неоднородная структура также влияет на качество позиционирования. Особенно это касается одиночных крупномасштабных неоднородностей на пути траектории навигационного сигнала. Ошибка может достигать 10-30 м и более, в зависимости от конкретных ионосферных условий и дополнительных факторов. В то же время возмущения типа ПИВ практически не влияют на конечный результат. Изменения обычно составляют не более 2 м. Однако, может возникнуть «плавающий эффект», когда рассчитанное положение приемника постоянно смещается вблизи некоторой точки.

5.5. Выводы

Данная глава посвящена спутниковым методам трансionoсферного зондирования (ТИЗ), обладающим большим разнообразием, как по высотам орбит спутников, так и по расположению передающих и приемных систем. Основной задачей является разработка методов ТИЗ применительно к будущим экспериментам. Основным экспериментальным материалом являются трансionoграммы – набор измеренных действующих расстояний для различных частот, который в зависимости от состояния ионосферы может содержать сложную систему следов (треков). Основная особенность этого типа зондирования заключается в используемом диапазоне частот – это ВЧ радиоволны (КВ), испытывающие огромное влияние изменения ионосферных параметров, что позволяет строить методы их диагностики. При решении задачи используется общий подход, заключающийся в моделировании различных ситуаций методом расчета траекторий КВ в модельной ионосфере.

Основные результаты главы можно суммировать следующим образом.

- Показаны возможности использования следующих типов спутников: 1) низкоорбитальные (одиночные или группировка), 2) геостационарные, 3) высокоапогейные, 4) система «спутник- спутник».
- В рамках первого варианта отличием от предыдущих исследований является учет отражений от Земли. Впервые проведенное моделирование с учетом этих отражений позволило объяснить наблюдение ЗНС-ионограмм, т.е. ионограмм с задержанным

нижним следом, и выявить их широкие диагностические возможности.

- В рамках второго варианта основное внимание уделено арктическому региону. Предложен метод многочастотного радиопросвечивания. Показаны его преимущества при установке излучателя на спутнике и приеме сигналов на Земле по сравнению с методом внешнего зондирования с низкоорбитальных спутников, в частности, засветка большой широтной зоны. Обнаружено существование «квази-педерсеновских» лучей.
- Третий вариант также направлен на обеспечение ионосферной информацией систем в арктическом регионе. Показано, что двух спутников достаточно для круглосуточного наблюдения за российскими регионами.
- Четвертый вариант рассмотрен на примере приемника на МКС и бортового ионозонда на КА «Прогресс-М». Предложено несколько схем экспериментов, в том числе ТИЗ и метод обратного трансionoсферного радиозондирования (ОТИЗ). Показано, что можно получать параметры не только главного слоя ионосферы F2, но и спорадического слоя Es.
- Во всех случаях показана возможность диагностики крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений и мелкомасштабных неоднородностей.

Все это разнообразие методов направлено на увеличение знаний о параметрах ионосферы с целью создания более точных ионосферных моделей и более точного определения условий распространения радиоволн. Наибольший эффект следует ожидать от совместного использования трансionoграмм и ионограмм вертикального и наклонного зондирования.

Для повышения точности спутникового позиционирования рекомендуется вместо упрощенной «модели Клобучара» использовать современные ионосферные модели с учетом коррекции по экспериментальным данным ионосферного зондирования. Анализ полученных результатов показывает, что с помощью GPS-приемников возможно проводить диагностику неоднородных структур вблизи пункта регистрации.

Результаты, приведенные в этой главе, и другие вопросы, связанные с моделированием и возможностями применения принципов трансionoсферного зондирования к диагностике ионосферы, опубликованы в [92,199,202,203,207-220] и были представлены на международных конференциях [221,222].

Глава 6. Использование полного электронного содержания для определения состояния ионосферы

Наибольшая новизна при определении состояния ионосферы связана с использованием полного электронного содержания ТЕС, которое стало одним из основных параметров ионосферы при появлении навигационных спутников и определяется в результате трансionoсферного зондирования со спутников, имеющих различные орбитальные высоты от низких, порядка 500-1000 км, до высот GPS-спутников порядка 20000 км и геостационаров с высотой порядка 36000 км.

Преимуществами использования являются возможность непрерывного глобального мониторинга, большое количество GPS приемников. В настоящее время с использованием ТЕС связано большое количество направлений, из которых можно выделить: 1) позиционирование, 2) разработку эмпирических моделей ТЕС, 3) разработку индексов возмущенного состояния ионосферы, 4) оценку критической частоты f_oF2 , с которой связана максимальная применимая частота наклонных трасс распространения КВ-радиоволн.

6.1. Результаты тестирования моделей группы IRI и их адаптация к экспериментальным данным f_oF2 и ТЕС

В этом подразделе представлены результаты первого этапа исследований с использованием полного электронного содержания ионосферы ТЕС, в период которого было решено несколько задач с использованием модели IRI.

Модель IRI до сих пор остается самой широко используемой моделью и тестируется учеными многих стран. Достаточно привести состав членов рабочей группы IRI (рисунок 6.1), активно участвующих в оценке этой модели [223].

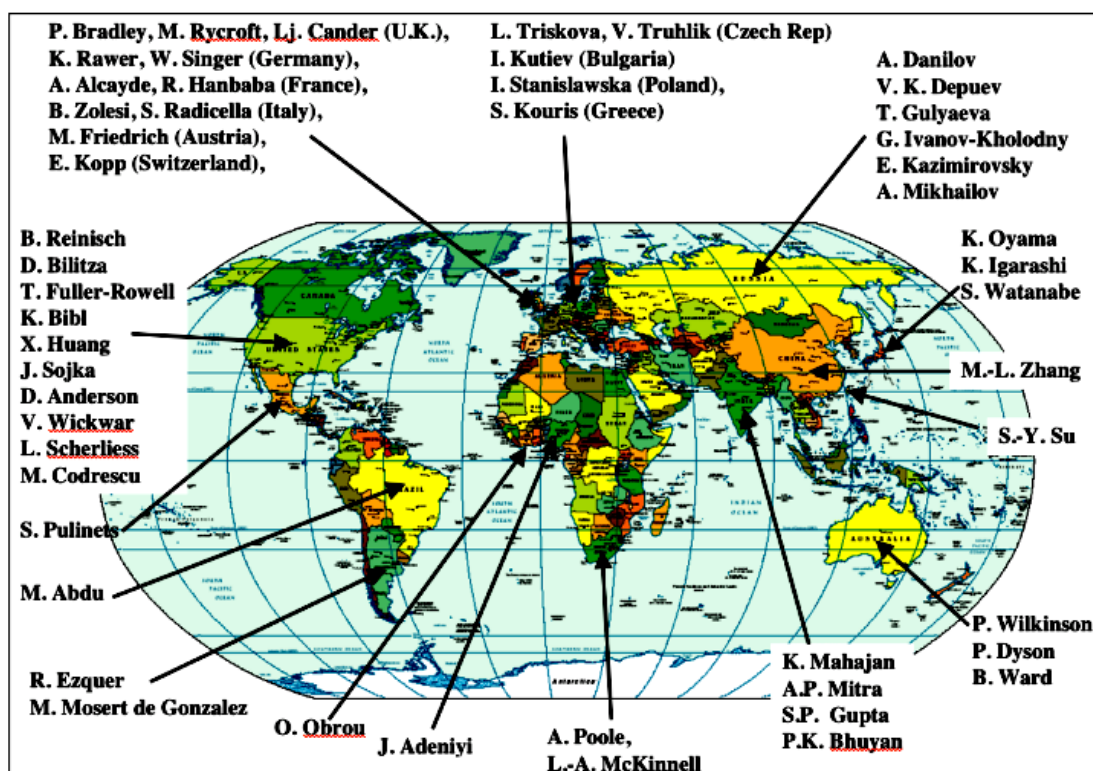


Рисунок 6.1 - Состав рабочей группы, курирующей развитие модели IRI

Однако до появления навигационных спутников и измерения полного электронного содержания ионосферы основной задачей модели IRI было обеспечение значений параметров нижней ионосферы. С появлением систем спутниковой связи возникла потребность в моделировании параметра TEC. И уже первые работы показали, что модель IRI не совсем корректно определяет этот параметр (например, [224]). В работе [225] была представлена модель IRI-2007, которая включала две новые опции определения $N(h)$ -профиля верхней ионосферы (сог и NeQ) в дополнение к предыдущей версии IRI-2001. Первая опция сог является поправочным множителем модели IRI-2001, представленным в работе [226]. Вторая опция NeQ это – модель NeQuick, разработанная в работах [227,228]. Естественно, что новая модель нуждалась в тестировании. В работе [229] было отмечено, что модель IRI не является эмпирической по TEC, поскольку этот параметр вычисляется интегрированием $N(h)$ -профиля. На самом деле, на тот момент эмпирических моделей TEC практически не существовало [230], поэтому тестирование в [229] проводилось по глобальным картам JPL, CODE, UPC, ESA [231] и по TEC-RAL базе данных, рассчитанных методом [232]. Также был предложен и использован еще один метод тестирования с помощью эквивалентной толщины ионосферы $\tau = \text{TEC} / \text{NmF2}$. В этом случае величина TEC определялась из выражения $\text{TEC} = \tau * \text{NmF2}$, где NmF2 может быть взята из любой эмпирической модели. В [229] использовалась эмпирическая модель $\tau(\text{Kouris})$ из [233]. Один из результатов представлен в таблице 6.1 для месяцев 2003 года и станции Nailsham.

Таблица 6.1. Результаты тестирования модели IRI-2007 по данным глобальных карт и эмпирической модели τ [229].

$ \Delta $, TECU	JPL	CODE	UPC	ESA	IRI2001	Bil	NeQ	Kouris
1	3.45	1.32	5.88	1.51	1.90	2.19	2.72	3.43
2	2.78	0.92	3.57	1.48	4.04	2.51	2.62	1.92
3	3.69	2.02	3.07	2.78	4.82	3.59	3.60	3.53
4	3.81	1.69	3.03	3.37	3.47	2.82	2.89	2.14
5	3.26	1.09	1.82	2.26	3.88	3.31	3.26	3.52
6	4.03	1.64	2.64	2.40	2.21	2.17	2.22	1.77
7	3.76	1.48	2.24	2.85	2.81	4.21	4.61	1.50
8	2.70	0.96	1.12	1.59	1.85	1.98	2.08	1.32
9	3.25	1.24	1.61	1.23	1.84	1.69	1.88	1.02
10	3.30	0.98	1.83	1.48	2.13	1.08	1.33	1.17
11	3.31	1.49	1.65	1.42	3.53	2.12	1.82	1.31
12	2.02	0.79	0.83	1.39	2.55	2.12	2.10	0.92
mean	3.28	1.30	2.44	1.98	2.92	2.48	2.59	1.96

Общий вывод [229]: обе новые опции дали лучшие результаты, чем модель IRI2001, причем модель с опцией NeQ дала лучшие результаты, чем модель с опцией сог. Использование модели τ (Kouris) дало в 2 раза лучшие результаты, чем модели с новыми опциями, и в 3 раза лучшие, чем модель IRI2001. Среди карт TEC лучшие результаты дала карта CODE. Эти результаты относительно опции NeQ совпали с результатами [234]. Опция NeQ выбрана по умолчанию на сайте модели (http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html). В работе [235] исследовано, насколько хорошо модель IRI отражает такие особенности поведения TEC, как сезонная, широтная и долготная зависимости, реакция на возмущения, соответствие значениям реального времени. Сравнивались модели IRI2001 и IRI2007. Для этого добавлен расчет модельных значений TEC с адаптацией к экспериментальным значениям foF2. Примеры сравнения сезонного хода даны на рисунке 6.2 для станции Ebre в 2000 году. В качестве экспериментальных TEC используются значения базы RAL. Индекс RT относится к адаптированной модели.

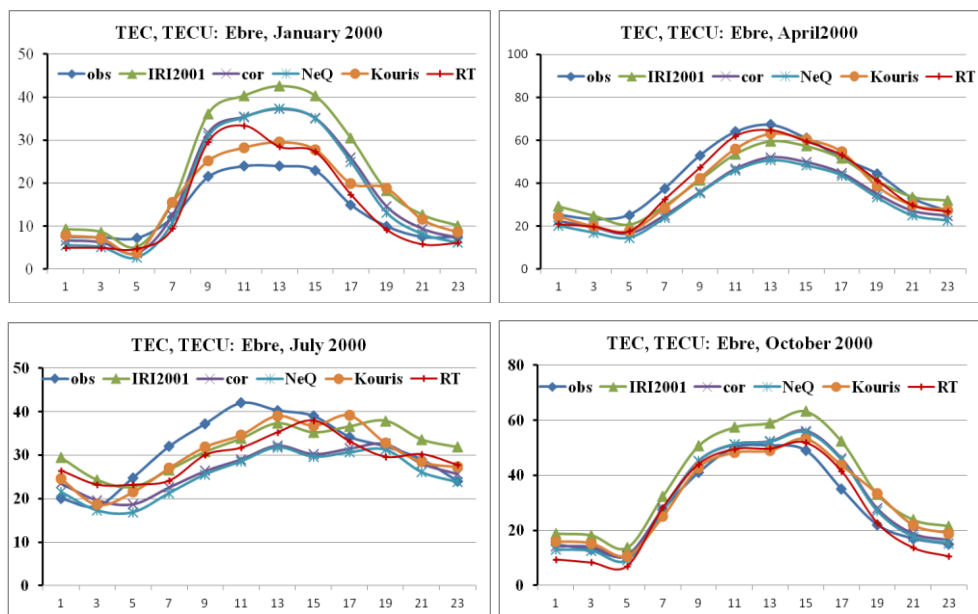


Рисунок 6.2 - Сравнение суточных ходов для различных сезонов и методов определения ТЕС

Суточный ход и сезонная зависимость в различные сезоны воспроизводятся достаточно хорошо, однако различия значений зависят от сезона. Наиболее близким к экспериментальным являются значения модели Kouris, второй по близости является адаптированная модель. В январе и октябре наибольшими являются значения модели IRI2001, наименьшими – экспериментальные значения. В апреле и июле наибольшими являются экспериментальные значения, наименьшими – значения обеих опций (cor и NeQ) модели IRI2007, которые во все сезоны близки друг к другу. Наибольшие различия между значениями наблюдаются в январе. Были проведены первые сравнения широтной и долготной зависимостей, два примера которых даются на рисунках 6.3-6.4.

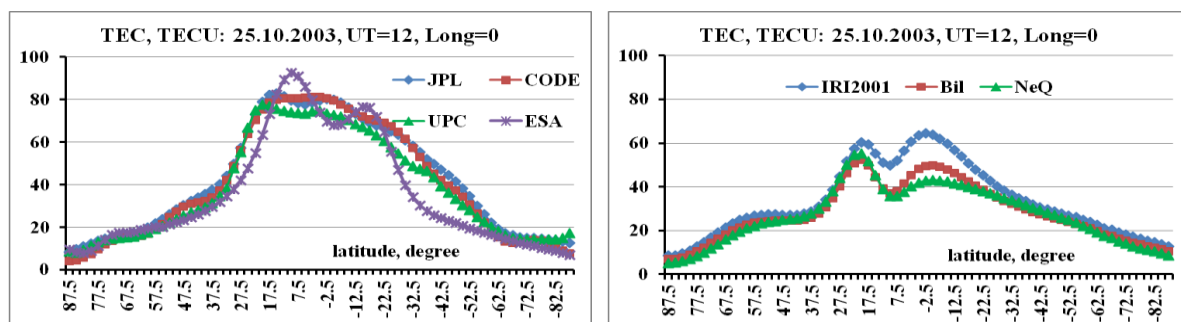


Рисунок 6.3 - Пример широтной зависимости ТЕС для долготы 0°, 25.10.2003, UT=12. В левой части даются значения глобальных карт, в правой – модельные значения

Значения карт между собой и опций модели между собой мало различаются за исключением карты ESA, однако, большие различия между картами и моделью существуют в низкоширотных и экваториальных областях.

Известно, что модель IRI описывает спокойные условия. В 2002 году в работе [236]

был предложен новый индекс (STORM-factor), который учитывал изменения критической частоты во время возмущенных условий. Это – интеграл от индекса геомагнитной активности a_p по предыдущим 33 часам, полученный методом сингулярного разложения. Этот фактор привел к наличию двух опций в модели IRI: “off”, относящейся к спокойным условиям, и “on”, корректирующей модель с учетом возмущенных условий. Роль этого фактора иллюстрируется на рисунке 6.4 в виде долготной зависимости ТЕС для последних дней октября 2003, когда наблюдалась одна из сильнейших магнитных бурь. На рисунке 6.4 показывается влияние мощной бури октября 2003 на долготную зависимость ТЕС в дни этого периода: 25.10 - слабо возмущенный день, 29.10 – отрицательное возмущение, 30.10 – положительное возмущение. Результаты для модели IRI приводятся для двух опций: “off” для исходной модели и “on” с учетом storm-фактора.

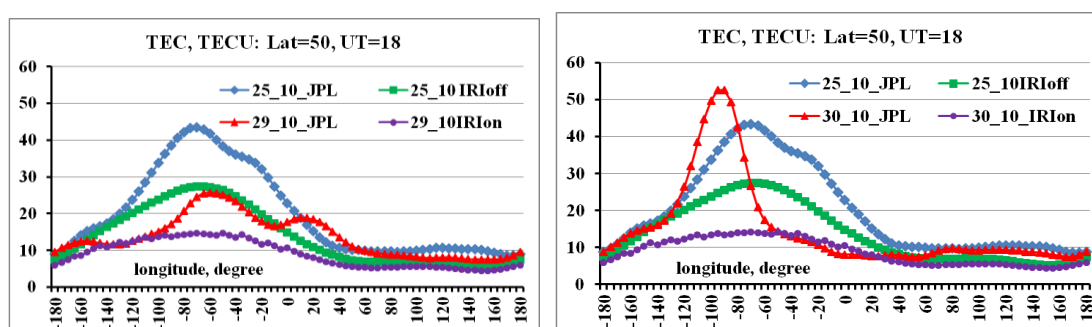


Рисунок 6.4 - Поведение ТЕС в глобальном масштабе во время мощной бури октября 2003: широта 50°, UT=12

Модель правильно отражает только характер отрицательного возмущения. Во всех этих примерах модель недооценивает значения ТЕС. Одной из причин является не учет плазмосферной части $N(h)$ -профиля.

Как видно из рисунка 6.2, адаптация модели IRI к экспериментальным значениям $foF2$ улучшила соответствие ТЕС, однако показала наличие остаточного расхождения. В работе [237] проанализирован коэффициент $K(TEC) = TEC(obs)/TEC(IRI) = K(Nm) * K(\tau)$, где $K(Nm)$ включает отличие $NmF2(obs)$ от $NmF2(IRI)$, а $K(\tau)$ включает отличие $\tau(obs)$ от $\tau(IRI)$. Коэффициент $K(\tau)$ рассчитывался для трех опций модели IRI: IRI2001, cor, NeQ с целью улучшить определение ТЕС в реальном времени. Получены следующие результаты: 1) вклад множителя $K(\tau)$ может превышать вклад $K(Nm)$, 2) $K(IRI2001)$ в большинстве случаев больше 1, коэффициенты $K(cor)$, $K(NeQ)$ меньше 1, 3) использование эмпирической модели τ позволило улучшить определение ТЕС и $foF2$ в реальном времени. Показано, что коэффициент $K(\tau)$ может использоваться для определения адаптированной частоты $foF2$ по формуле

$$foF2(adapt) = foF2(IRI) * \sqrt{\frac{TEC(obs)}{TEC(IRI) * K(\tau)}}.$$

Необходимо отметить, что эта формула отличается от формулы (1) из работы [238], переходящей из одной работы этих авторов в другую, начиная с работы [239], как раз этим коэффициентом. Для иллюстрации на рисунке 6.5 приводится график из работы [237], на котором даны коэффициенты $K(\tau)$ для станций европейского региона и отношение ТЕС для различных опций модели IRI.

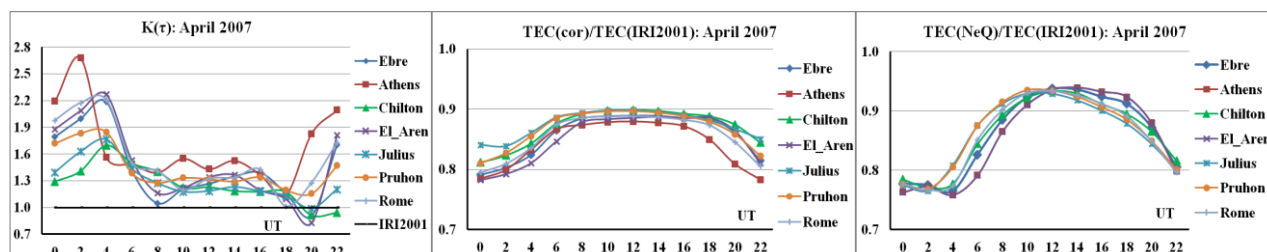


Рисунок 6.5 - Пример поведения корректирующих множителей модели IRI в европейском регионе

Коэффициент $K(\tau)$ практически всегда отличен от 1, т.е. имеется неточность в определении foF2. Рисунок 6.5 показывает, что в силу пространственной корреляции τ медиана $\tau(\text{med})$, рассчитанная по данным одной станции, может использоваться для улучшения определения foF2 в некотором радиусе. Эта возможность иллюстрируется таблицей 6.2, в которой приведены количественные оценки точности определения foF2 для исходной модели IRI и ее адаптации с помощью коэффициента $K(\tau)$, рассчитанного для станции Pruhonice, для трех месяцев 2007 (апрель, июль, ноябрь). Столбцы относятся к 7 европейским станциям. В строках даются следующие данные: вторая - количество дней N , для которых были доступны данные, третья – среднемесячная погрешность исходной модели IRI, четвертая и пятая – стандартные и относительные стандартные отклонения. Следующие строки показывают такие же результаты при использовании коэффициента $K(\tau)$.

Видно существенное улучшение определения foF2 при использовании ТЕС соответствующей станции и коэффициента $K(\tau)$ станции Pruhonice.

Более того, был предложен более простой метод определения частоты foF2, соответствующей экспериментальному значению ТЕС, чем мощные математические методы, лежащие в основе глобальных ассимиляционных моделей, например, [240]. Метод заключается в использовании медианы $\tau(\text{med})$ (за месяц, 27 дней или другой период), получаемой из экспериментальных ТЕС и foF2.

Таблица 6.2. Сравнение точности определения foF2 для исходной и адаптированной модели IRI.

April 2007	Chilt	Julius	Pruhon	El_Aren	Ebre	Rome	Athens
N	23	27	27	10	13	24	28
$ \Delta f_o F_2 $, IRI	0.41	0.4	0.46	0.88	0.62	0.76	0.95
σ (IRI), MHz	0.5	0.49	0.55	1.01	0.77	0.87	1.15
σ (IRI), %	11.92	11.8	12.61	19.91	15.2	18.2	23.57
$ \Delta f_o F_2 $, K(Pruh)	0.35	0.3	0.23	0.47	0.41	0.43	0.51
σ (K(Pruh)), MHz	0.42	0.35	0.29	0.63	0.54	0.54	0.63
σ (K(Pruh)), %	9.77	8.3	6.56	12.4	10.6	11.2	12.69
July 2007	Fairf	Julius	Pruhon	El_Aren	Ebre	Rome	Athens
N	30	31	31	21	31	28	31
$ \Delta f_o F_2 $, IRI	0.60	0.54	0.66	1.04	0.85	1.02	1.07
σ (IRI), MHz	0.78	0.62	0.80	1.26	1.06	1.24	1.25
σ (IRI), %	16.44	14.71	17.67	22.84	20.51	24.38	25.97
$ \Delta f_o F_2 $, K(Pruh)	0.60	0.27	0.35	1.07	0.69	0.76	0.64
σ (K(Pruh)), MHz	0.87	0.34	0.57	1.32	0.98	1.10	0.87
σ (K(Pruh)), %	18.23	7.88	12.52	22.89	18.52	21.23	17.62
November 2007	Chilt	Julius	Pruhon	El_Aren	Ebre	Rome	Athens
N	30	21	30	29	26	30	30
$ \Delta f_o F_2 $, IRI	0.85	0.82	0.89	1.29	0.96	1.09	1.25
σ (IRI), MHz	1.00	1.06	1.15	1.43	1.12	1.30	1.45
σ (IRI), %	29.69	30.14	31.10	34.27	25.92	32.85	36.45
$ \Delta f_o F_2 $, K(Pruh)	0.52	0.41	0.26	0.59	0.40	0.38	0.54
σ (K(Pruh)), MHz	0.61	0.48	0.34	0.77	0.50	0.44	0.63
σ (K(Pruh)), %	17.91	13.41	8.96	18.21	11.40	11.06	15.80

Корректирующие множители были определены для других станций земного шара: Ташкент (41.3°N, 69.6°E), Магадан (59.58°N, 150.8°E), Пекин (40.0°N, 116.3°E), Boulder (40.0°N, 254.7°E), Chongqing (29.5°N, 106.3°E), Hobart (42.2°S, 147.44°E) [241]. Получено, что корректирующие множители для опции IRI2001 везде больше 1, множители для опций сог и NeQ меньше 1. Оценена возможность использования других версий τ для определения foF2: τ (IRI, IRI), τ (obs, IRI), τ (obs, obs). Таблица 6.3 показывает отклонения $|\Delta f_o F_2|$ для различных станций, рассчитанные с использованием 3-х опций τ , в сравнении с отклонениями для исходной модели для апреля 2000, показанными в столбце obs-IRI.

Таблица 6.3. Отклонения $|\Delta f_o F_2|$ для исходной модели и 3-х опций τ .

станция	широта	долгота	obs-IRI	$\tau(\text{IRI}, \text{IRI})$	$\tau(\text{obs}, \text{IRI})$	$\tau(\text{obs}, \text{obs})$
Beijing	40N	116.3	0.58	1.00	0.50	0.34
Boulder	40N	254.7	1.05	0.65	0.68	0.44
Chongqing	29.5N	106.3	0.86	1.67	0.72	0.63
Hobart	24.2S	147.4	1.49	1.23	1.30	0.86
Magadan	59.6N	150.8	1.14	0.85	0.89	0.70
Tashkent	41.3N	69.6	0.77	1.62	0.82	0.48

Наилучшее соответствие обеспечивается коэффициентом $\tau(\text{obs}, \text{obs})$. Вариант использования коэффициента $\tau(\text{obs}, \text{IRI})$, рассчитываемого по экспериментальным значениям ТЕС и модельным значениям NmF_2 , также может улучшать соответствие по сравнению с $\tau(\text{IRI}, \text{IRI})$, но всегда хуже по сравнению с $\tau(\text{obs}, \text{obs})$.

Еще более важной задачей является определение $f_o F_2$ с использованием ТЕС вдоль трассы распространения радиоволны. Возможность решения такой задачи показана в [242] на примере трассы Кипр-Москва длиной $D=2293\text{ км}$. Значения максимальных наблюдаемых частот МНЧ получены в ИЗМИРАН [243] для апреля 2002 г. Этот месяц включал возмущенный период с 17 по 22 апреля с минимумом $Dst \sim -150$ нТл. Рисунок 6.6 показывает результаты использования значений ТЕС в точке середины трассы для определения МПЧ.

Для расчета $f_o F_2$ в точках вершин трасс с одним и двумя скачками по значениям ТЕС использовалась $\tau(\text{med})$, рассчитанная по значениям на концах трассы. В верхней части показаны сами значения ТЕС. В нижней части даны экспериментальные значения МНЧ и значения МПЧ для одного и двух скачков, рассчитанные с использованием ТЕС. Экспериментальные значения показаны сплошными кружками, полученные из ТЕС – полыми.

Видно, что в большинстве случаев значения МНЧ отсутствуют и поведение МПЧ может быть восстановлено с достаточной точностью не только в спокойные дни, но и во время возмущений.

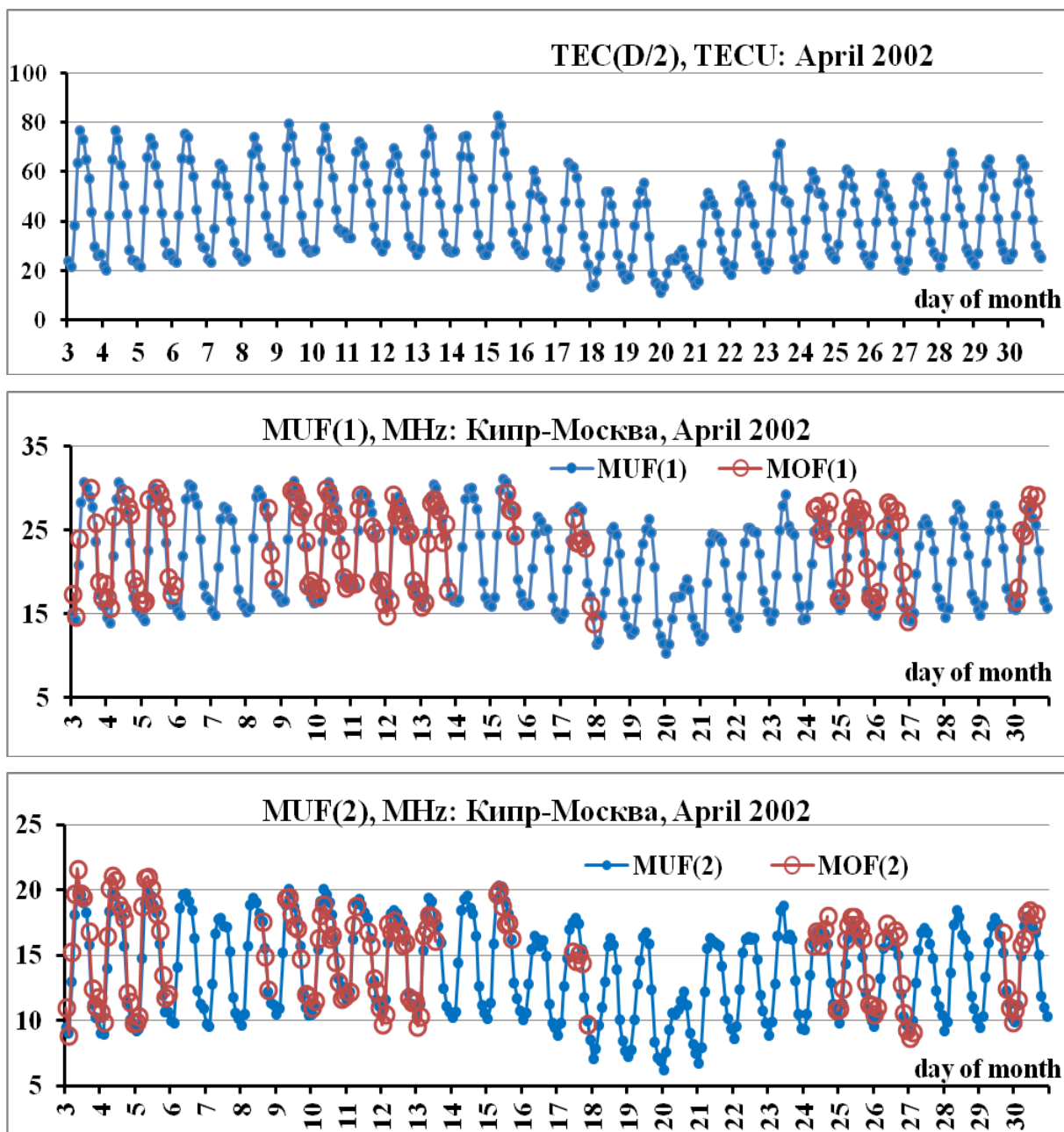


Рисунок 6.6 - Поведение ТЕС в середине трассы Кипр-Москва и МПЧ, восстановленное с использованием этого параметра

В работе [244] проведено сравнение различных способов контроля условий распространения радиоволн. К ним относятся:

- модель ионосферы;
- критические частоты, определенные по ионограммам вертикального зондирования;
- критические частоты, рассчитанные по измерениям ТЕС;
- значения максимальных наблюдаемых частот для заданной наклонной трассы,
- значения концентрации плазмы, измеренные на спутнике.

Работа [242] была дополнена результатами для трассы Inskip-Moscow по данным [243]. Рисунок 6.7 построен по принципу рисунка 6.6.

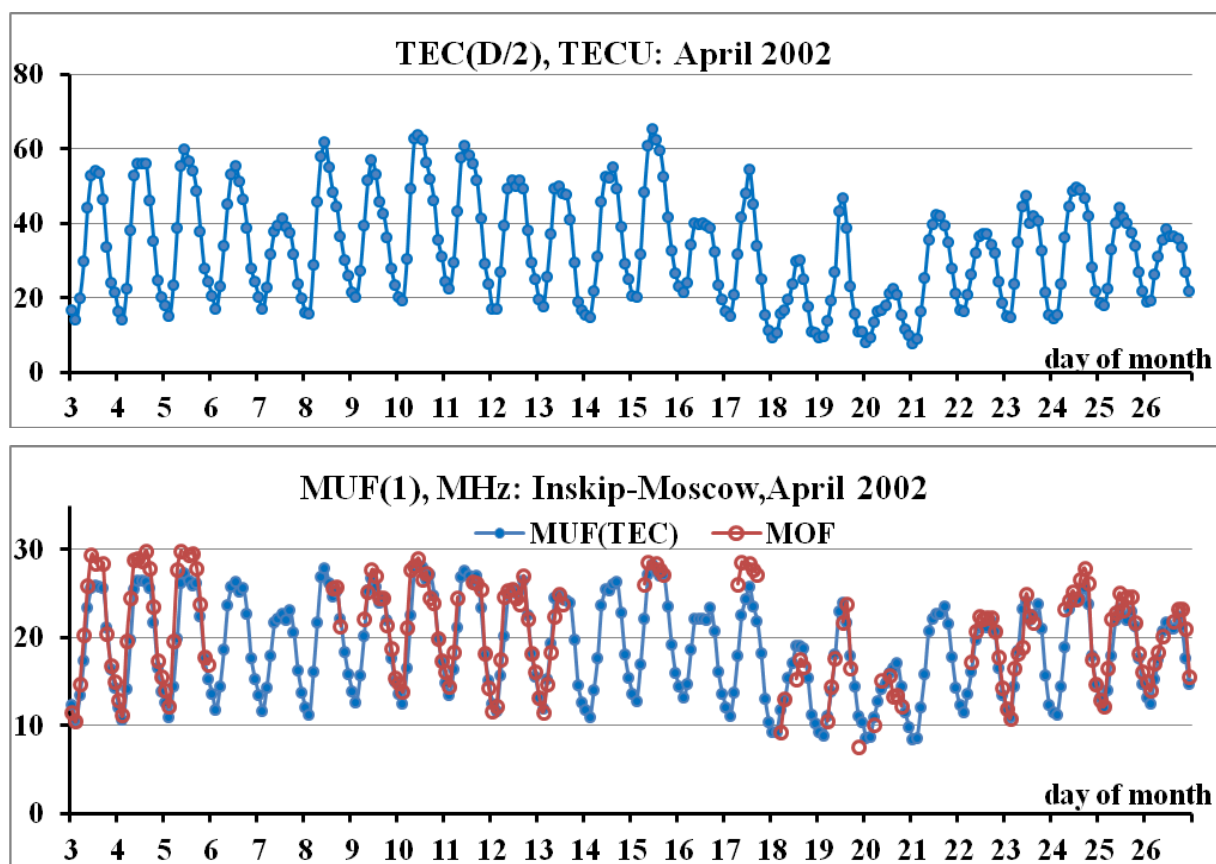


Рисунок 6.7 - Поведение ТЕС в середине трассы Inskip-Moscow и МПЧ, восстановленное с использованием этого параметра

Дополнительно были приведены результаты для этой трассы в виде суточного хода медиан МПЧ и $\tau(\text{med})$ для станций на концах трассы и вблизи ее середины (рисунок 6.8). Сделан вывод, что эквивалентная толщина ионосферы может использоваться для контроля условий распространения. Но видно, что в данном случае и модель IRI обеспечила хорошее соответствие с экспериментальными данными.

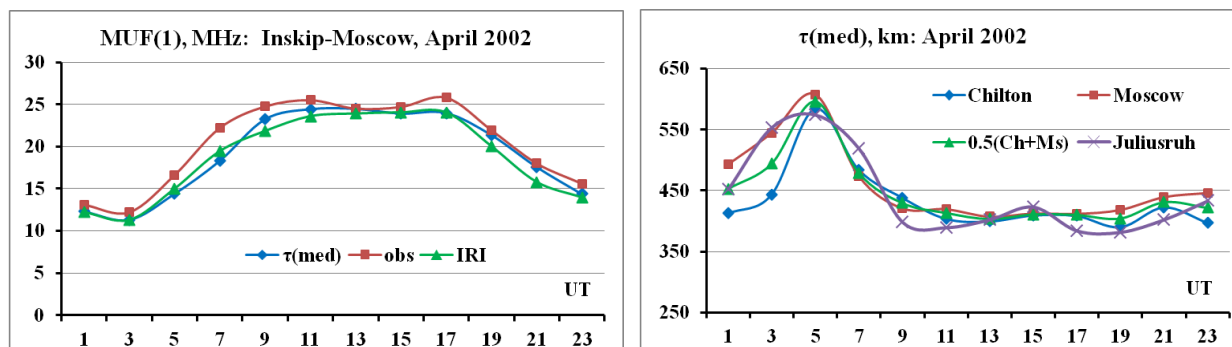


Рисунок 6.8 - Сравнение экспериментальных и рассчитанных медиан MUF для трассы Inskip-Moscow (левый график) и медиан τ (правый график) для различных станций в апреле 2002

6.2. Краткие результаты работы [34]

В работе [34] проведено обобщение и добавлены новые результаты. Кратко они заключаются в следующем. В первой главе представлены методы экспериментального определения ТЕС и указано на глобальные GIM-ТЕС карты как на основной источник экспериментальных данных, позволивших выявить особенности поведения ионосферы за длительный период низкой солнечной активности, который впервые случился за всю историю современных геофизических и радиофизических наблюдений. Многие модели ионосферы были модифицированы с учетом полученных фактов. В частности, это привело к пересмотру индексов солнечной активности, запускающих модели. Однако проблема согласования экспериментальных и модельных значений параметров не была решена для периода низкой активности. Тем не менее, несколько работ было опубликовано. В работе [245] изучалась реакция ионосферы на геомагнитные возмущения с использованием ТЕС. В работе [246] данные станции Ankara показали, что различия между глобальными картами JPL, CODE, UPC, ESA могут составлять 1.2-2 раза. В работе [247] такие оценки были получены для всего европейского региона. Глава 2 работы [34] представляет методы определения ТЕС, основанные на интегрировании $N(h)$ -профилей. Кратко описываются модели IRI и IRI-Plas с акцентом на верхнюю и плазмосферную части профиля. Особое внимание уделено модели IRI-Plas [248], преимущества которой показаны в [81]. Среди основных преимуществ можно выделить учет плазмосферной части $N(h)$ -профиля и возможность адаптации модели IRI-Plas к экспериментальным значениям $TEC(obs)$. Эти преимущества были подтверждены тестированием модели по данным различных экспериментов, в частности, были использованы данные радаров некогерентного зондирования и спутников CHAMP и DMSP. Радаров существует не так много. В данном разделе даются примеры сравнения с данными среднеширотного радара StSantin. Результаты представлены на рисунке 6.9 в виде профилей плазменной частоты $f_{ne}(h)$. В порядке упоминания на графиках приводятся чисто модельный профиль (IRI), профили модели IRI-Plas, адаптированной к экспериментальным значениям $foF2(obs)$ или $TEC(obs)$, а также к экспериментальным значениям двух параметров $foF2(obs)$ и $TEC(JPL)$. Главным является профиль радара ISR, показанный полыми кружками.

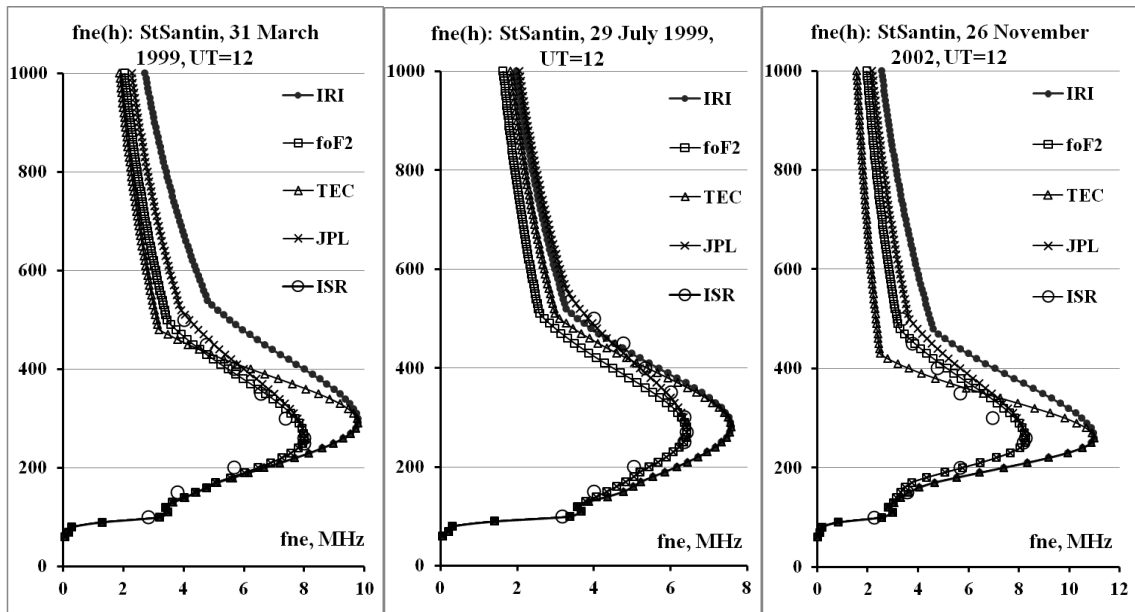


Рисунок 6.9 - Пример сравнения модельных и экспериментальных $N(h)$ -профилей над станцией HP StSantin

В данном случае видно хорошее совпадение. Рисунок 6.10 дает пример несовпадения, причем несовпадение относится не только к верхней части профиля, но и к нижней.

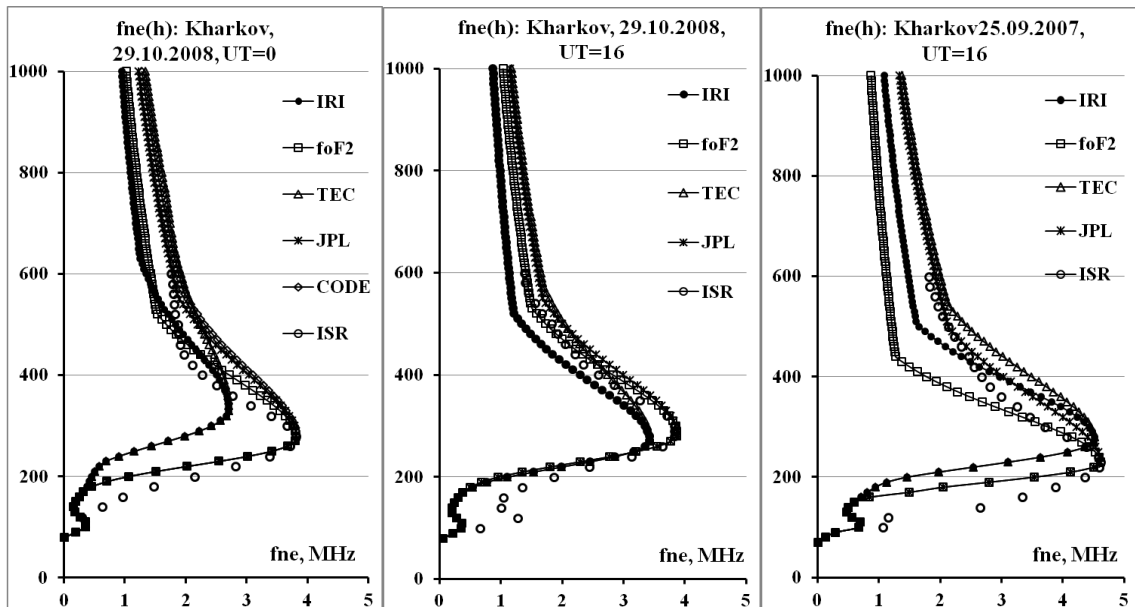


Рисунок 6.10 - Пример сравнения модельных и экспериментальных $N(h)$ -профилей над станцией HP Харьков

Отсутствие совпадения при полной адаптации свидетельствует о том, что необходимо дополнительно корректировать форму профиля модели. Для этого на рисунках 6.11-6.12 для станции Ленинград в апреле 2001 приводятся модельные $fne(h)$ -профили и указываются для сравнения данные спутников CHAMP и DMSP черными прямоугольниками.

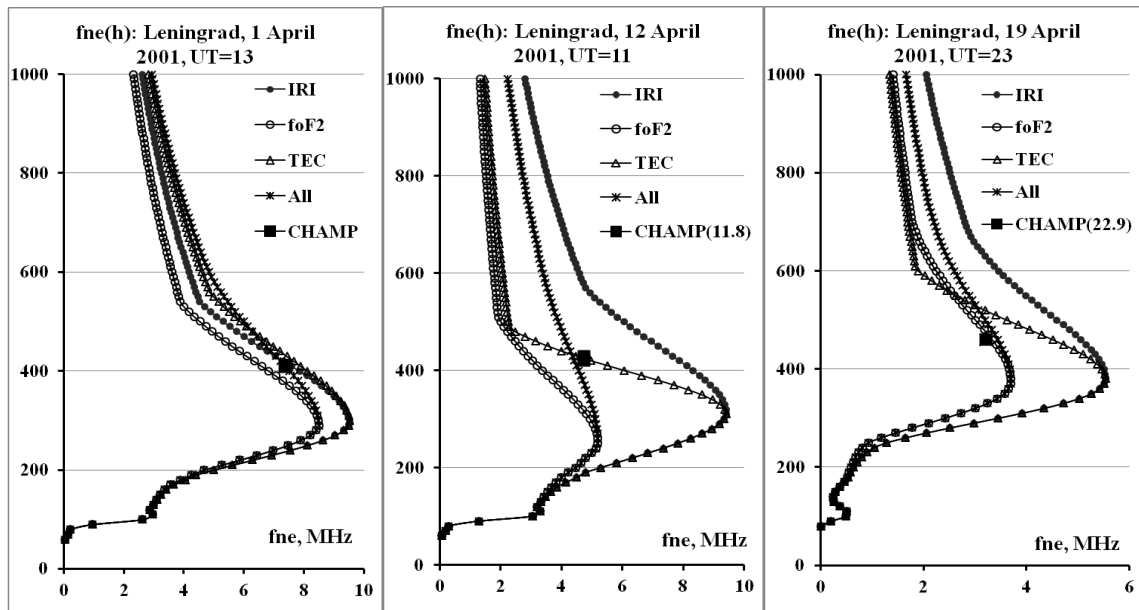


Рисунок 6.11 - Результаты сравнения профилей модели IRI-Plas с данными спутника CHAMP

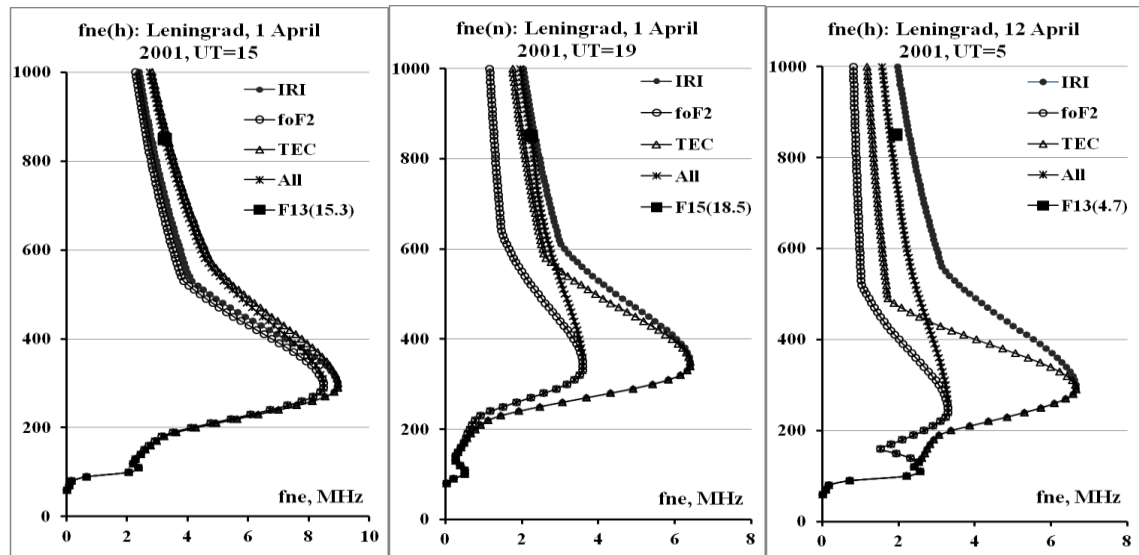


Рисунок 6.12 - Результаты сравнения профилей модели IRI-Plas с данными спутника DMSP

Видно, что оба параметра ($foF2$ и TEC) играют существенную роль в согласовании, особенно в тех случаях, когда сильно различаются модельные и реальные значения $foF2$.

В §2.3 проведено сравнение модельных и экспериментальных значений TEC . В работе [243] наибольшие различия между картами TEC получены в конкретные дни 25 и 28 апреля 2001. На рисунке 6.13 приводятся такие значения для эталонной станции Juliusruh и станции Москва, на рисунке 6.14 показаны месячные медианы вместе с модельными кривыми.

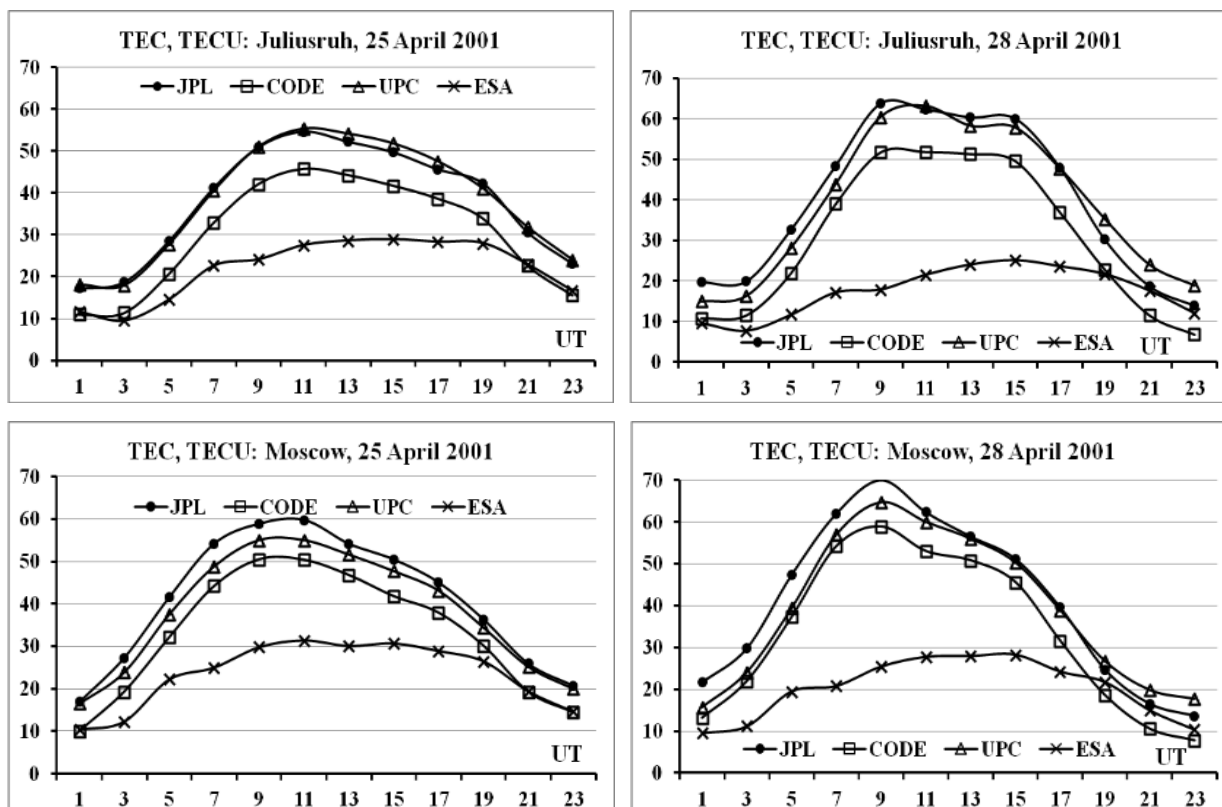


Рисунок 6.13 - Сравнение значений GIM-TEC, рассчитанных для различных глобальных карт и двух среднеширотных станций Juliusruh и Москва

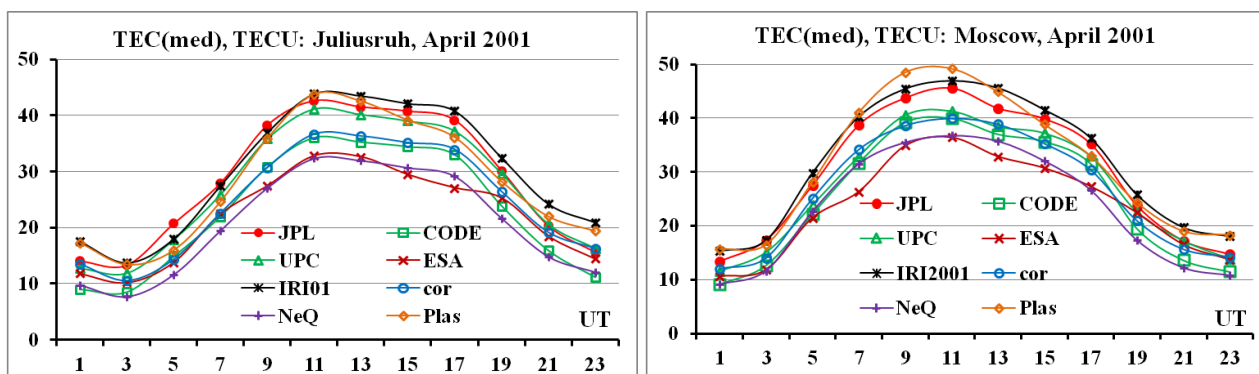


Рисунок 6.14 - Сравнение медиан GIM-TEC, рассчитанных для различных карт, с модельными значениями для станций Juliusruh и Москва

Видно, что значения карт JPL и UPC близки. Сильно выделяется заниженными значениями карта ESA. В конкретные дни (они были спокойными в данном случае) значения сильно отличаются от медиан. При сравнении с моделями к значениям карты JPL ближе всего мода IRI-Plas и опция IRI2001. Значения опции NeQ близки к значениям карты ESA. Количественные оценки соответствия между экспериментальными и модельными значениями даются в Таблицах 6.4-6.5 с помощью абсолютных и относительных средних квадратических отклонений (СКО) при выборе значений карты JPL в качестве экспериментальных. Значения представлены для 8 станций по всему земному шару.

Таблица 6.4. Абсолютные СКО для карты JPL, TECU.

JPL	CODE	UPC	ESA	IRI01	cor	NeQ	Plas
Juliusruh	6	1.67	7.56	3	4.76	8.39	2.64
Moscow	4.69	3.02	7.17	2.16	3.66	6.64	2.60
Manzhouli	6.27	5.37	4.97	4.31	7.41	7.45	5.60
Goose	5.85	1.86	6.19	10.05	2.20	5.55	3.52
Thule	9.22	3.36	7.82	11.07	2.13	11.50	5.67
Ascension Island	3.81	8.02	8.67	10.57	12.82	12.61	21.04
Grahamstown	6.11	3.50	8.35	4.52	4.45	4.19	5.26
Port Stanley	3.41	6.50	7.02	10.09	6.81	7.60	9.34

Таблица 6.5. Относительные СКО для карты JPL, %.

JPL	CODE	UPC	ESA	IRI01	cor	NeQ	Plas
Juliusruh	20	5.80	26.33	9	16.57	29.24	9.20
Moscow	15.68	10.09	23.97	7.23	12.23	22.21	8.68
Manzh	17.22	14.73	13.64	11.82	20.34	20.44	15.38
Goose	24.35	7.74	25.77	41.84	9.16	23.10	14.66
Thule	36.95	13.47	31.32	44.36	8.54	46.07	22.72
AscIs	1.93	7.78	9.03	10.09	13.36	13.08	17.93
Grah	19.00	10.88	25.96	14.05	13.83	13.04	16.36
PortS	12.98	24.71	26.70	38.37	25.88	28.89	35.49

Видно, что по абсолютным СКО наилучшее соответствие получено для европейских среднеширотных станций, наихудшее для станций южного полушария, по-видимому, из-за малого числа приемников, входящих в базу данных. Наилучшее соответствие среди моделей получено для опции IRI «cor». Такие же результаты получены для модели IRI-Plas за исключением станции Ascension Island. Относительные отклонения оказались наихудшими для высокоширотной станции Thule. Возможно, это связано с условиями высокой солнечной активности, но независимо от активности можно сделать вывод, что ни одна модель не может обеспечить одинаково хорошее соответствие для всех станций. В любом случае полученные цифры можно использовать при оценке региональных моделей.

Важный результат представлен на рисунке 6.15, отражающий влияние показанных различий TEC на N(h)-профили. В результате таких различий при адаптации модели IRI-Plas получаются различные N(h)-профили. Все множество профилей можно представить с помощью следующих опций: 1) профиль исходной модели (без адаптации), 2) профиль с

адаптацией к экспериментальному значению f_oF_2 , 3) профиль с адаптацией к экспериментальному значению TEC, 4) профиль с адаптацией к экспериментальным значениям f_oF_2 и TEC. Опция 1 соответствует ситуации, когда нет никакой экспериментальной информации. С этим профилем идет сравнение при оценке того, насколько доступная априорная информация улучшает соответствие с профилем, принятым за реальный. Опция 2 определяет нижнюю часть профиля, которая может быть принята за реальную. Опция 3 показывает профиль, соответствующий экспериментальному значению TEC. Опция 4 определяет профиль, адаптированный к экспериментальным значениям f_oF_2 и TEC. В рамках этой опции сравниваются адаптационные возможности различных карт JPL, CODE, UPC. Крупными точками показаны значения плазменных частот f_{ne} спутников CHAMP и DMSP. Профили рассчитаны для станции Москва для двух дней июля 2004.

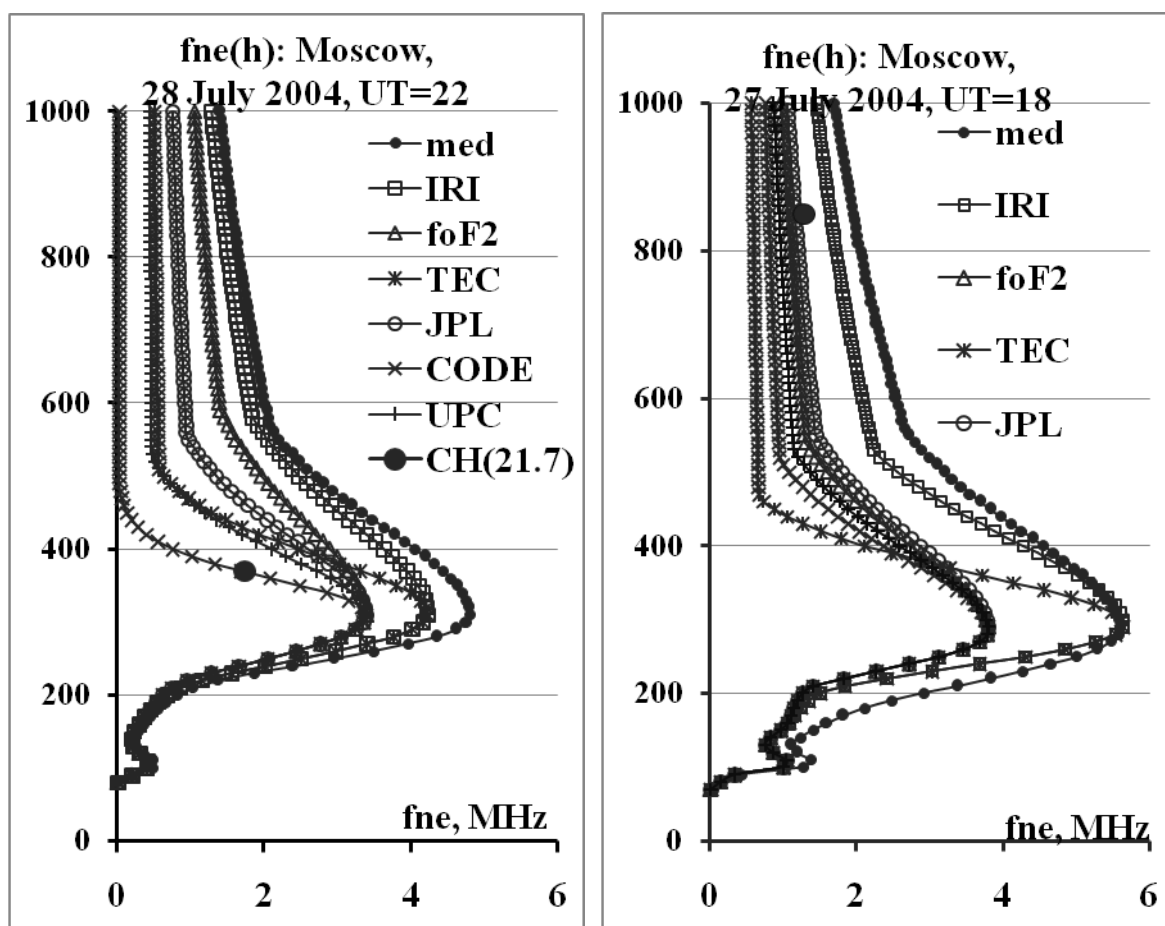


Рисунок 6.15 - Сравнение $N(h)$ -профилей, соответствующих адаптации модели к различным значениям f_oF_2 и TEC

В данном случае через точку измерения плазменной частоты проходит один из профилей, но в общем случае этого может и не случиться. Для этого случая в работе [34] предложена адаптация модели IRI-Plas с учетом плазменных частот, измеряемых на спутниках. Она проводится путем подбора такого значения $TEC(f_{ne})$, при котором $N(h)$ -

профиль на высоте спутника соответствует значению fne и проходит через точку с $foF2(obs)$. Результаты получены для 15 станций в различных регионах земного шара. Некоторые примеры даны на рисунке 6.16 в виде сравнения значений $TEC(fne)$ и GIM-TEC для карт JPL, CODE, ESA. Значения для карты UPC близки к $TEC(JPL)$. Большинство результатов попало в утренне-вечерний сектор UT (5, 7, 17, 19) и показано для всех дней, когда были пролеты и данные вертикального зондирования.

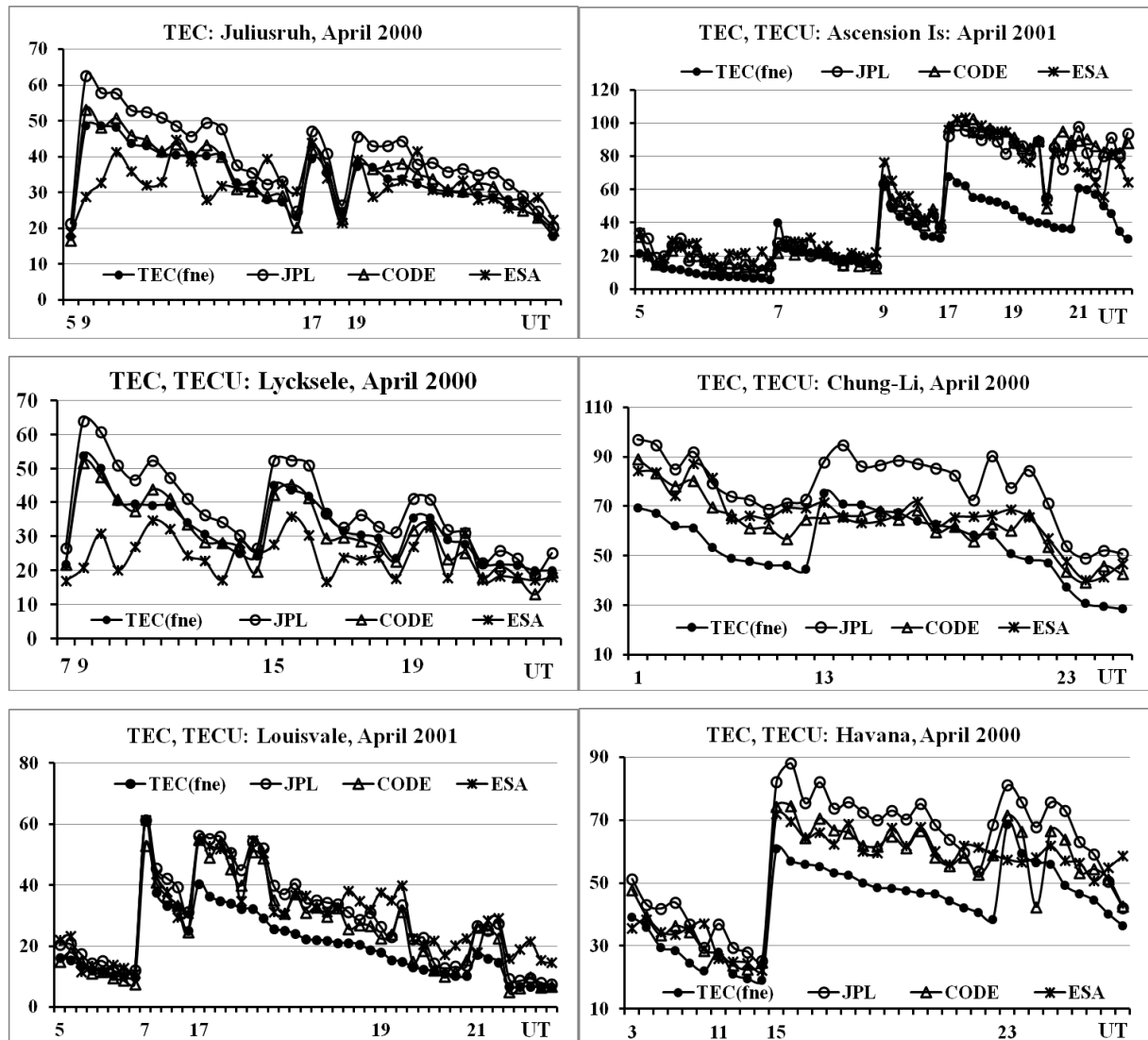


Рисунок 6.16 - Сравнение значений TEC для станций в различных регионах

Европейский сектор представлен станцией Juliusruh, для которой значения $TEC(fne)$ совпадают с $TEC(CODE)$, значения $TEC(JPL)$ завышены по сравнению с $TEC(fne)$, а $TEC(ESA)$ занижены. Результаты для станции Lycksele представляют блок станций Kiruna, Sodankyla, Thule. По своему характеру они близки к результатам для станции Juliusruh. Несколько отличаются результаты для самой высокоширотной станции Thule: значения $TEC(fne)$ превышают $TEC(CODE)$ и лежат ближе к $TEC(JPL)$, больше разброс значений. В

южноафриканском секторе результаты даны для станции Louisvale, которая лежит между двумя другими станциями Grahamstown и Madimbo. В этой зоне значения $TEC(fne)$ оказались ниже значений всех карт, для более высокоширотной станции Grahamstown для $UT=5, 7$ они совпали с $TEC(CODE)$ и $TEC(ESA)$, а для более низкоширотной станции Madimbo обнаружились резкие скачки TEC для всех карт в различные дни. Для станции Ascension Island, которая лежит в экваториальной зоне, занижение $TEC(fne)$ видно в вечерние часы. Для станции Chung Li дальневосточного региона низкие значения $TEC(fne)$ характерны для утренних часов, также как и для станции Havana. Согласование $TEC(fne)$ с картами свидетельствует о том, что в определенные периоды и в определенных регионах модель IRI-Plas может правильно описывать форму профиля не только в верхней, но и в плазмосферной частях. Необходимо исследовать, каким образом нужно корректировать эту форму там, где нет согласования.

В главе 3 представлены методы эмпирического моделирования. Изложение относится к наиболее заметным на тот период моделям: модель Клобучара [249], тайваньская эмпирическая модель [250], немецкая эмпирическая модель NGM [251], болгарская глобальная эмпирическая модель [252]. Модель Клобучара является наиболее распространенной для коррекции ионосферной задержки для одночастотных спутников и используется автоматически, так как необходимая для этого информация передается в навигационном сообщении. Она служит эталоном при оценке других моделей коррекции. Тайваньская модель является примером региональной модели. Ее особенностью является вычисление TEC с использованием ежесуточных индексов солнечной активности. Пример, рассчитанный для августа 2002 для станции Chung Li, при сравнении с $TEC(JPL)$ дал величину абсолютных отклонений 6.4 TECU, СКО для абсолютных отклонений 8.3 TECU, СКО для относительных отклонений 16.4%, что лежит в границах Таблиц 6.4-6.5. Еще одна эмпирическая модель NGM является глобальной и определяет не только TEC , но и $foF2$. Ее простота (12 коэффициентов для TEC и 13 коэффициентов для $NmF2$ для всего земного шара) делает ее исключительно полезной, однако необходимо тестировать модель на точность. В работе [253] было проведено тестирование этой модели по данным станций Москва и Ростов и проведено сравнение с моделью IRI. В работе [34] добавлено сравнение с моделью IRI-Plas и результаты показаны на рисунке 6.17. Дополнение коснулось только TEC , поскольку критические частоты моделей IRI и IRI-Plas близки.

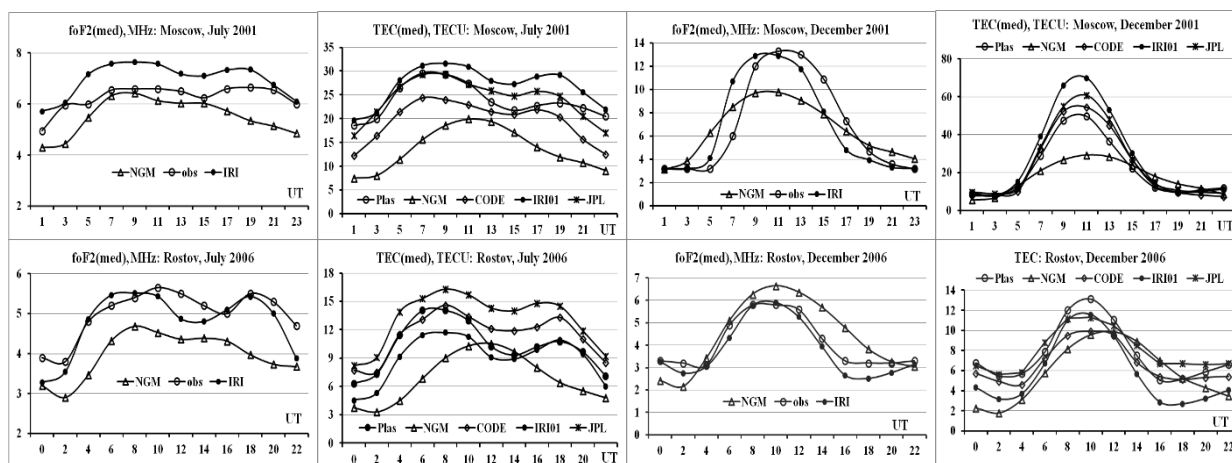


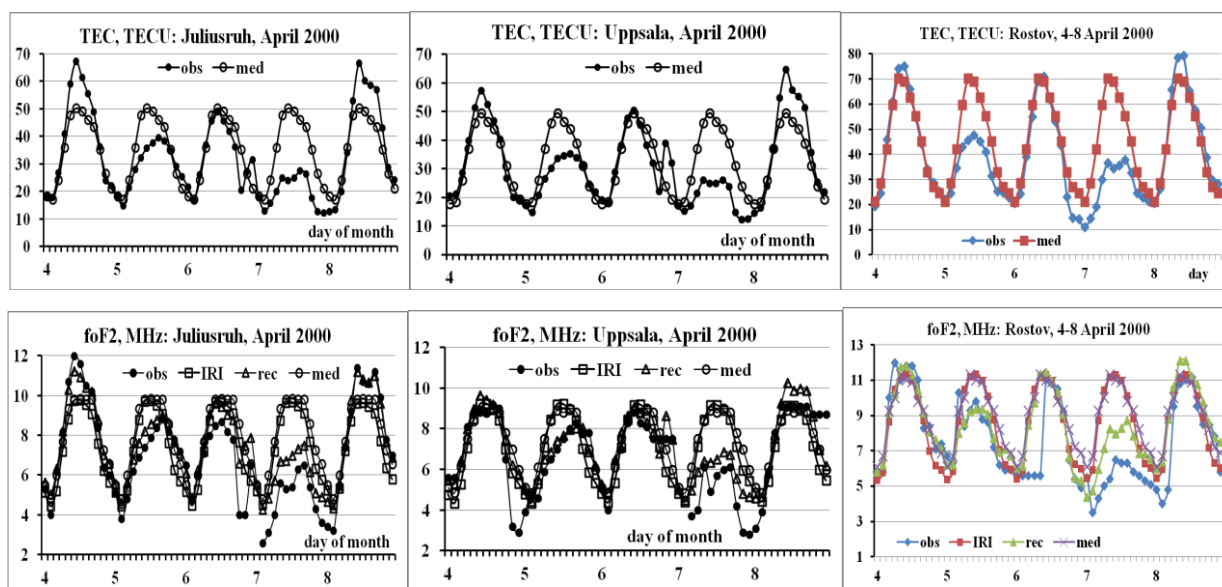
Рисунок 6.17 - Сравнение параметров модели NGM с моделями IRI и IRI-Plas и картой JPL

Рисунок 6.17 показывает, что эмпирическая модель NGM не имеет преимуществ перед моделями IRI и IRI-Plas. Детальное тестирование модели NGM показало, что и в других регионах эта модель не имеет преимуществ перед моделями IRI и IRI-Plas. Была сделана попытка уточнить результаты модели NGM: поскольку она разработана по данным карты CODE, сравнение проведено с TEC(CODE). Получилось, что преимущественно при низкой солнечной активности существуют регионы, для которых модель NGM обеспечивает результаты лучшие, чем модели IRI и IRI-Plas.

Болгарская модель отличается учетом регулярной волновой структуры приливной природы, воздействующей из нижней атмосферы. Она построена по картам CODE. Модель включает 4374 константы, определяемые методом наименьших квадратов из пространственно-временной структуры TEC. Сравнение с моделью NGM показало уменьшение ошибки в 2 раза. На основании проведенных сравнений сделан вывод о том, что тестирование моделей остается актуальной задачей, поскольку ни одна модель не может одинаково хорошо работать во всех широтных зонах и необходимо иметь набор моделей, соответствующих отдельным регионам.

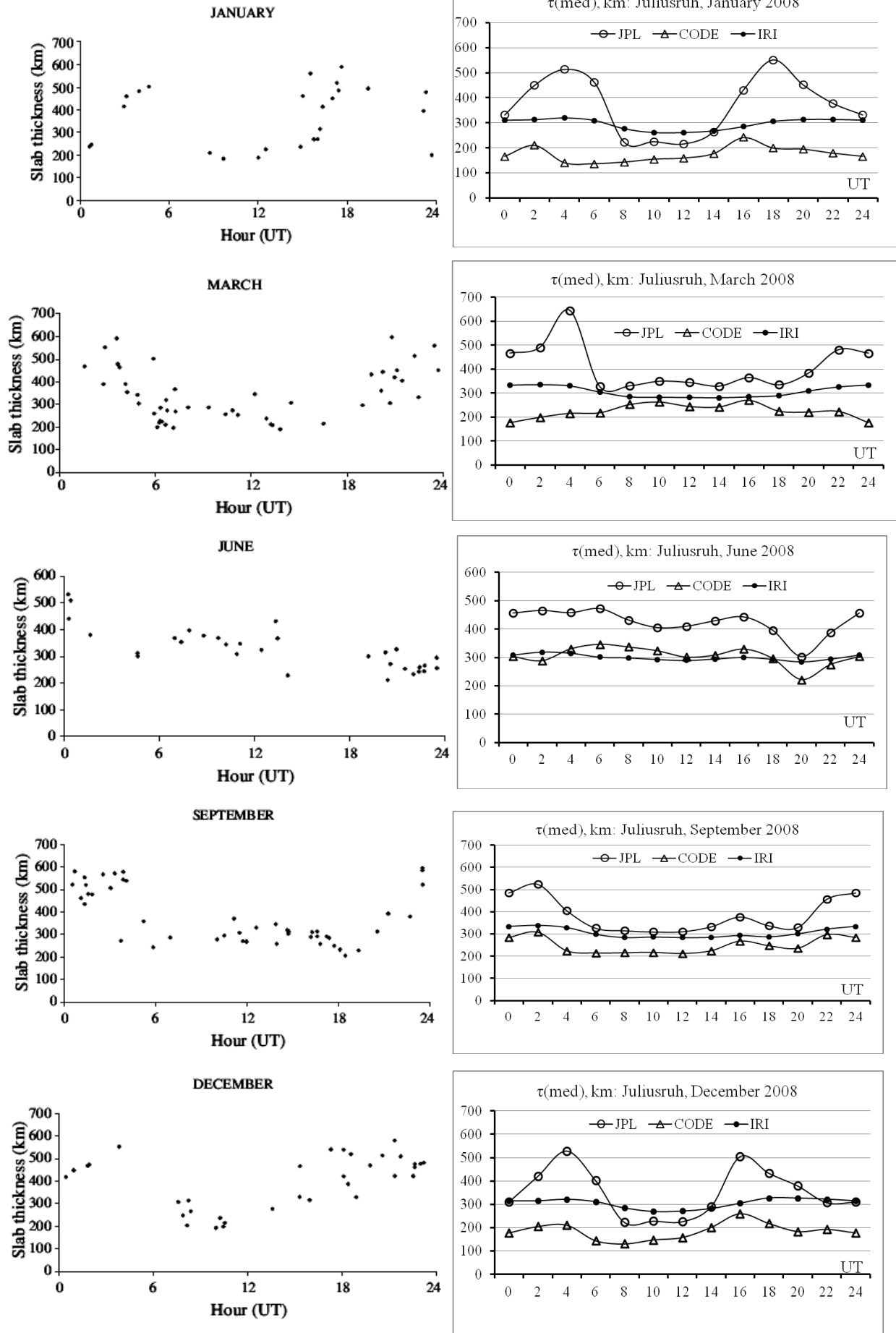
Глава 4 [34] посвящена использованию эквивалентной толщины ионосферы τ для определения параметра $NmF2$. Величина τ является коэффициентом пропорциональности между TEC и $NmF2$: $TEC = \tau \cdot NmF2$, т.е. $\tau = TEC / NmF2$ является шириной прямоугольника с постоянной плотностью $NmF2$. Таким образом, по значениям TEC и τ можно определить $NmF2$ или $foF2$, а по ним и частоты МПЧ, которые являются произведением $foF2$ на множитель $M(D)$, зависящий от длины трассы D . Традиционно в качестве τ используется модельное значение $\tau(IRI) = TEC(IRI) / NmF2(IRI)$ [248, 254]. В работе [245] предложено использовать медиану $\tau(\text{med}) = \text{med}(TEC(\text{obs}) / NmF2(\text{obs}))$, рассчитанную по экспериментальным значениям $TEC(\text{obs})$ и $NmF2(\text{obs})$, и показано, что эта медиана позволяет

определять foF2 во время возмущений или заполнять пробелы данных foF2. Примеры даны на рисунке 6.18 для трех станций в апреле 2000. Верхние графики показывают поведение ТЕС вместе с медианой. Нижние графики состоят из 4 кривых: 1) экспериментальные значения (значок obs), 2) экспериментальная медиана (med), 3) кривая модели IRI (IRI), 4) значения foF2(rec), рассчитанные (восстановленные) по экспериментальным значениям ТЕС(obs) с использованием медианы $\tau(\text{med})$ – значок rec.



6.18 - Иллюстрация использования медианы $\tau(\text{med})$ для определения foF2

Видно, что оба параметра (foF2 и ТЕС) изменяются синхронно, показывая отклик ионосферы Рисунок на возмущения, который оказывается положительным в первый день возмущения (4.04.2000) и отрицательным (7.04.2000) в отличие от foF2(med) и foF2(IRI), которые почти не изменяются. В работе [34] приведены первые сравнения $\tau(\text{med})$ с независимыми измерениями из работы [255], в которой даны значения τ , усредненные по широте в европейском регионе. Поскольку экспериментальные значения τ практически отсутствуют, важно использовать эти значения для тестирования параметра τ . На рисунке 6.19 значения τ можно сравнить визуально. Значения $\tau(\text{med})$ показаны для станции Juliusruh, глобальных карт JPL, CODE и 2008 года.

Рисунок 6.19 - К совпадению экспериментальных и модельных медиан τ

Видно, что для карты JPL имеется не только качественное, но часто и количественное соответствие. В частности, имеется ярко выраженный предрассветный максимум в зимний, весенний и осенний периоды. Можно отметить вечерние усиления. Значения для карты CODE намного меньше по величине с менее выраженным предрассветным максимумом, который в марте вообще не виден. Для модели IRI характерны почти постоянные значения, которые в дневное время могут быть близки к $\tau(\text{med})$. Предрассветный максимум отмечался в ряде работ, в частности [256]. Его отсутствие по данным карты CODE и модели IRI можно считать большим недостатком, связанным, по-видимому, с некорректным определением TEC в период низкой солнечной активности.

В заключительных разделах 4.2 и 4.3 в [34] проводится сравнение параметров $\tau(\text{NGM})$ и $\tau(\text{IRI})$ с экспериментальными данными в попытке найти модель, которую можно было бы использовать для определения foF2 из TEC. Отмечается, что лучшей оценкой являются отклонения рассчитанных модельных значений foF2 от экспериментальных. Большая статистика показала, что $\tau(\text{NGM})$ и $\tau(\text{IRI-Plas})$ обычно дают результаты лучше, чем модель IRI, но хуже, чем $\tau(\text{med})$.

В заключение в работе [34] выделяется статья [257], посвященная анализу, моделированию и мониторингу эквивалентной толщины ионосферы на основе данных станции Dourbes с 1994 по 2002 гг. Наиболее интересными являются результаты по изменению τ во время возмущений: обнаружена зависимость поведения τ от времени начала магнитной бури. Увеличение значений τ во время возмущений связывается с увеличением TEC при постоянных или уменьшенных значениях foF2 . Однако для подтверждения этого вывода необходимо более детально изучать синхронность вариаций foF2 и TEC. Достижением авторов [257] является разработка оперативной системы LIEDR, включающей значения τ в дополнение к NmF2 и TEC.

6.3. Результаты после публикации работы [34]

В этом разделе описывается состояние исследований и приводятся результаты по тем направлениям, которые были выделены в [34]. Огромный поток публикаций за последние годы свидетельствует о том, что были выбраны актуальные направления. В первую очередь это относится к глобальным картам GIM-IGS. Несмотря на появление статей, в которых используются другие базы, например, *madrigal* [258], базы GAS китайской академии наук и WHU вуханьского университета [259], индийской системы GAGAN [260] и других, база TEC GIM-IGS [231] остается основной. Есть упоминание о том, что значения карт можно получать через 1 час и даже 15 мин, однако реально это относится только к карте CODE

(через 1 час). Это должно повысить эффективность использования ТЕС.

В разделе эмпирического моделирования наметился переход к разработке локальных моделей по данным локальных систем приемников, например [260-263]. Большое число публикаций посвящено модели Klobuchar в связи с ее ролью в позиционировании. Как отмечено в [34], эта модель является эталоном для сравнения с другими моделями. И, действительно, проведено много сравнений с целью найти способ уменьшения ошибки в определении времени задержки сигналов. Альтернативой являются GIM карты, эмпирические модели ТЕС и модели, основанные на интегрировании $N(h)$ -профиля (IRI, IRI-Plas, NeQuick). В наиболее интересной статье [263] проведено сравнение GIM карты CODE с 4-мя моделями: Klobuchar, NeQuick2, NTCM и IRI2012. Ценность результатов в том, что для CODE использовались данные в зените для 200 станций, т.е. устранялась ошибка, связанная с пересчетом наклонных ТЕС в вертикальные. Результаты представлены в виде глобальных карт, на которые нанесены области преимущества той или иной модели. Оказалось, что в большем числе случаев лучшими были эмпирические модели Klobuchar или NTCM. Однако этот результат не может рассматриваться, как окончательный или, тем более, как рекомендация к использованию той или иной модели, потому что он зависит от региона, солнечной или геомагнитной активности и других факторов. Кроме того, есть все еще существенная часть случаев, для которых лучшая модель не могла быть идентифицирована однозначно. В статье [264] проведено сравнение моделей Klobuchar и NeQuick для трех географических зон (околоэкваториальной, средне- и высокоширотной: широты 24.09°N , 52.94°N , 78.93°N) и трех уровней ионосферной активности (спокойные условия, средняя и сильная активность) с данными GIM-IGS. Результаты даны в виде процента улучшения СКО для задержки. В околоэкваториальной зоне модель Klobuchar показала преимущество на 23% в спокойных условиях, на 23.4% при средней активности и 25.4% при сильной активности. В среднеширотной зоне преимущество имела модель NeQuick с улучшением СКО на 65.3% в спокойных условиях, на 27.1% при средней активности. При сильной активности преимущество имела модель Klobuchar на 9.6%. В высокоширотной зоне модель NeQuick показала преимущество на 59.2%, 26%, 13.7%.

Много работ относится к восточным регионам, поскольку модель Klobuchar разработана по данным среднеширотных европейского и американского регионов. В качестве примеров можно указать на статьи [265]. В статье [266] показано, что использование GIM карт в 2014 на Тайване на 42.31% уменьшило 95% ошибку позиционирования. В статье [266] по данным трех станций (Trivandrum, Hyderabad и Delhi) сравнили задержки моделей Klobuchar и IRI-2007 с измеренными в периоды весеннего и осеннего равноденствий в 2006 году. Получили большое преимущество модели IRI-2007:

относительное линейное отклонение для модели Klobuchar составило от 8.31% до 54.21%, для модели IRI-2007 от 1.43% до 8.31%.

Хотя использование альтернативных вариантов имеет преимущество, некоторые усилия были затрачены на модификацию самой модели Klobuchar. В статье [267] дан обзор работ, в которых делаются попытки улучшить определение коэффициентов модели Klobuchar и предлагается свой метод на основе многослойного приближения для области ионосферы, пересекаемой лучом, и разложения по сферическим гармоническим функциям. Основное внимание уделяется ночной задержке, которая является константой в исходной модели Klobuchar. Предложенная модель улучшает коррекцию на 62.69%/78.93% в спокойных и возмущенных условиях по сравнению с исходной моделью Klobuchar. Если предыдущие работы основаны на малой статистике, то в работе [268] использованы данные базы GIM-IGS с 1998 по 2015. Работа направлена также на улучшение точности модели при определении ночной части NVTEC (Nighttime Vertical Total Electron Content), которая имеет постоянное значение 9 TECU на частоте L1. Получены вариации NVTEC в глобальном масштабе в зависимости от солнечной активности, сезона, широты. Например, усредненное по земному шару значение NVTEC за целый год в 2007 (минимум солнечной активности) равно приблизительно 6 TECU с очень небольшими изменениями. Это приблизительно на 3 TECU меньше, чем константа NVTEC в модели Klobuchar. Такое же среднее в течение 2004 (умеренная солнечная активность) равно приблизительно 11 TECU в пределах от 7 TECU до 15 TECU. В 2001 (высокая солнечная активность) среднее за год равно приблизительно 23 TECU с диапазоном изменения между 12 TECU и 36 TECU. Усредненное за все годы значение NVTEC практически во все дни года превышает 9 TECU, т.е. полученные результаты должны существенно улучшить работу модели Klobuchar. Даны глобальные карты NVTEC для всех сезонов 2001-2003 и для зимнего сезона 2005-2008.

Большое количество публикаций посвящено модели IRI-Plas. В работе [269] проведено сравнение модели IRI-Plas с экспериментальными данными GPS 9 станций (6 в северном полушарии, 3 в южном) с климатологической точки зрения в 2015 и в режиме сравнения значений в дни равноденствия и солнцестояния в 2014-2017. Климатологические вариации при исключении активных дней ($K_p \geq 6$, $Dst \leq -50$ nT, $F_{10.7} \geq 150$ sfu) дали среднюю разницу между TEC IRI-Plas и GPS на уровне 3-4 TECU, хотя отдельные значения разницы могли достигать 15 TECU. Коэффициенты корреляции между TEC IRI-Plas и GPS лежали в диапазоне от 74% до 91% в зависимости от станции. Приведены коэффициенты регрессии зависимости $TEC(IRI-Plas) = a * TEC(GPS) + b$. В принципе, эти коэффициенты могут выполнять роль эмпирической модели в рамках IRI-Plas. В дни равноденствия и солнцестояния разницы были на уровне $\sim 2-3$ TECU в северном полушарии и $\sim 4-5$ TECU в

южном. В работе [270] проведено детальное сравнение моделей IRI-Plas и NeQuick с экспериментальными данными 36 станций, расположенных в различных точках земного шара, за период почти солнечного цикла с января 2006 по июль 2017. Показано, что обе модели довольно точно отражают особенности поведения TEC, измеренного GNSS, независимо от уровня солнечной активности. Для большинства станций и моментов времени модель NeQuick имела большую точность, чем IRI-Plas. Количественные оценки показали, что среднегодовые ошибки прогнозов для NeQuick составили приблизительно 2–7 TECU, для IRI-Plas они лежали в диапазоне от 3 TECU до 12 TECU, что совпадает с работой [272]. Самые большие отклонения получены для низкоширотных станций в области экваториальной аномалии. Описывается, для каких станций и в каких условиях та или иная модель работает лучше. Источник расхождений искали с использованием расчетов f_oF2 по коэффициентам CCIR для имеющихся ионозондов. Действительно, недооценки и переоценки TEC связаны с соответствующими недооценками и переоценками f_oF2 . Однако, отмечается, что определенная доля расхождений может быть связана с нереалистичной формой профиля электронной концентрации или неправильным определением вклада плазмосферной части, т.е. в модели NeQuick плазмосферная часть может быть недооценена, а в модели IRI-Plas переоценена. Для количественной оценки построены графики зависимости модельных значений TEC от экспериментальных и рассчитаны среднеквадратичные отклонения. Обе модели описывают экспериментальные TEC в пределах 85%, однако СКО составили 11.96 TECU и 8.85 TECU для NeQuick и IRI-Plas, т.е., в общем, модель IRI-Plas определяет TEC более точно, чем NeQuick, в этом регионе.

Не ослабевает поток публикаций, посвященных сравнению TEC для различных моделей и GPS-TEC. Необходимо отметить, что при сравнении модельных и экспериментальных значений определенную роль играет плазмосферная часть TEC. Сравнения проведены для дней равноденствия (21 марта и 23 сентября) и солнцестояния (21 июня и 21 декабря) для трех лет низкой (2009), средней (2012) и высокой (2015) солнечной активности по данным станции Стамбул (40.91°N, 29.01°E). Для модели IRI2016 использовались все 3 опции. Получен ряд важных результатов: 1) без учета плазмосферной части ни одна модель не превосходит другую (в одних условиях одна модель дает лучшие результаты, в других условиях другая), 2) из трех опций модели IRI2016 лучшей является NeQ, 3) из трех индексов солнечной активности SSN1, IG and F10.7 наилучший результат обеспечивается использованием индекса IG, 4) разница между моделями IRI2016 и IRI-Plas не связана с различными индексами солнечной активности, 5) коэффициенты корреляции между GPS-TEC и моделями превышают 0.9 для всех условий солнечной активности.

Модель NGM использовалась в качестве эталона для сравнения методов

краткосрочного прогноза ТЕС, в частности: 1) передача значений предыдущего дня, 2) использование 27-дневной медианы, 3) Фурье разложение, включающее 5 компонент, 4) NGM [274]. Они сравниваются с глобальной картой UPC и данными локальной сети приемников системы SWACI по результатам за 2015 год. Если представить результаты работы [274] в виде оценки среднеквадратических отклонений в TECU, то можно получить следующую таблицу 6.6 (методы указаны цифрами).

Таблица 6.6. Сравнение методов краткосрочного прогноза с экспериментальными данными.

	1	2	3	4
SWACI	2.75	2.86	2.81	4.0
UPC	2.66	3.15	3.28	4.73

Можно видеть, что любой метод имеет преимущество перед NGM, что было показано в [34].

Таким образом, в работе [34] было показано преимущество локальной модели перед глобальной, поскольку обеспечивается более высокая точность представления параметра. Это стимулировало создание локальных моделей. В качестве примера можно привести локальную модель [261] для северо-восточного региона Китая (40–50°N, 120–130°E), названную TECM-NEC, по данным карты CODE с 1999 по 2015. Модель является произведением 4-х множителей, включающих суточный и сезонный циклы, зависимость от геомагнитного поля и солнечной активности. Аналитические выражения для некоторых множителей использованы из работ [251,252]. Модель имеет 43 коэффициента и описывает спокойные условия. Детальное сравнение с TEC(CODE) по данным за все годы дало линейное отклонение 0.03TECU и СКО 2.76TECU. Отмечено, что модель может воспроизводить такие локальные особенности поведения ТЕС в этом регионе, как среднеширотная летняя ночная аномалия и ночные усиления ТЕС. Необходимо отметить, что при построении локальной модели [261] использованы элементы болгарской модели [252]. Однако и сами авторы статьи [252] разработали локальную модель для области Балканского полуострова (35-50°N, 15-30°E) с использованием карты CODE за январь 1999-декабрь 2015 [275]. Модель отличается многими элементами, прежде всего тем, что моделирует отклик ТЕС на геомагнитное и солнечное воздействие с двумя улучшениями модели [252], связанными с краткосрочной изменчивостью солнечной активности и использованием «модифицированного» Кр-индекса. Модель описывает наиболее вероятное пространственное распределение и временную изменчивость отклика ТЕС в предположении, что они зависят от Кр, F10.7 и LT. Аномалии выражаются через относительные отклонения ТЕС от 15-дневного

среднего за 15 предшествующих дней τ TEC. В качестве тестового варианта использовали 2016 год, затем получали результаты для всего периода. Качественная оценка новой процедуры с использованием ошибки моделирования, рассчитанной за период 1999-2015, указывает на существенное улучшение по сравнению с глобальной моделью. Ошибка за 2016 также улучшилась. Для иллюстрации возможностей модели выбраны 3 магнитных бури (26–31 October 2003, 15–20 March 2015, 22–23 June 2015), сопровождаемые краткосрочными вариациями солнечной активности, для различных сезонов и солнечной активности. Поскольку рассматривались сильные возмущения, сравнивались варианты модели, когда учитывалась только геомагнитная изменчивость, и полный вариант. Для 2016 систематическая и среднеквадратическая ошибки с использованием только Кр-индекса составили 0.142 TECU и 2.077 TECU. Для полной модели эти оценки составили 0.036 TECU и 1.889 TECU. За весь период 1999-2015 с использованием только Кр-индекса получили 2.8 TECU и 3.6 TECU, полная модель дала 2.4 TECU и 3.1 TECU, т.е. полная модель уменьшает СКО на ~ 0.5 TECU. Для наиболее мощной магнитной бури в октябре 2003 оценки составили 2.76 TECU и 3.94 TECU, что оказалось намного лучше оценок, имеющих в литературе для этого периода для метода нейронных сетей, который является наиболее общим методом краткосрочного прогноза.

В работе [262] представлена локальная модель Турции по данным 68 станций, из которых 56 локальных станций из системы CORS-TR, а 12 входят в глобальную систему IGS. По данным с 2009 по 2015 вычислялись и сравнивались значения TEC с шагом 2 часа для одного дня каждого месяца. К этим значениям относятся локальная модель RIM, карты JPL, CODE, ESA и модель IRI2012. Приведено графическое сравнение значений, из которого видно хорошее соответствие RIM и всех карт и намного более низкие значения модели IRI2012. Поскольку все значения RIM и карт близки, трудно оценить преимущество локальной модели, тем более, что каждый месяц представлен одним днем. Эти модели не демонстрируют больших преимуществ локальных моделей: в модели [261] локальность не совсем строгая, поскольку модель построена по точкам карты CODE, а не по данным своих приемников, работа [262] является слабой в статистическом плане. От излишнего оптимизма предостерегает и работа [276]. Она также больше относится к разделу адаптации, однако затрагивает вопрос построения локальной модели TEC. В [276] для адаптации используются данные наземных GPS приемников (наклонные STEC) и $N(h)$ -профили, полученные по данным спутников FORMOSAT-3/COSMIC. Региональный характер связан не только с локальностью области (60°S , 30°N и 250°E , 340°E), но и с использованием В-сплайнов для аппроксимации профиля. По этим данным определялись новые значения следующих параметров: максимальной электронной концентрации NmF_2 , высоты максимума hmF_2 ,

масштаба высоты HF2, TEC. Модель тестировалась по данным ионозондов двух станций Jicamarca (-12.0°, 283.2°) и Port Stanley (-51.6°, 302.1°) и данным карты CODE во всех точках области. Результаты сравнения для NmF2 можно свести в таблицу 6.7.

Таблица 6.7. Сводная таблица по трем дням: относительные стандартные отклонения NmF2 между IRI, моделью [276] и ионозондами.

	01.07.2012		16.07.2011		16.07.2008	
	Jicamarca	Port Stanley	Jicamarca	Port Stanley	Jicamarca	Port Stanley
IRI	29.0	61.7	33.5	74.8	41.2	35.4
Model	18.4	63.7	26.6	66.2	35.8	32.7

Таблица показывает улучшение соответствия с экспериментальными данными для станции Jicamarca по сравнению с моделью IRI на 10.6%, 6.9% и 5.4% в 2012, 2011 и 2008. Улучшение для станции Port Stanley составило 8.6% в условиях умеренной солнечной активности, в остальных случаях модель не показала преимуществ. Однако оставшаяся часть расхождений намного больше. Результаты сравнения для TEC приведены в таблице 6.8.

Таблица 6.8. Относительные стандартные отклонения TEC между IRI, моделью [276] и CODE.

TECU	01.07.2012	16.07.2011	16.07.2008
IRI	6.4	4.7	2.8
Model	5.7	4.2	2.7

В этом случае преимуществ практически нет.

Сюда примыкает работа [277], поскольку в ней также ставится задача улучшения определения TEC в регионе Южной Африки в спокойных и возмущенных условиях. Представлены результаты адаптации и модификации модели IRI2012 по данным GNSS, а, главное, результаты последующего тестирования с использованием данных COSMIC и ионозондов. Модификация заключается в подборе солнечных индексов модели IRI2012 с целью уменьшить разницу между IRI TEC и GNSS TEC. Игнорирование влияния различия высоты определения TEC обосновывается тем, что для Южной Африки минимальное значение среднеквадратической разницы между IRI TEC и GNSS TEC составляет ~2.8 TECU для одних станций и ~3 TECU для других. К тому же приводятся количественные оценки вклада плазмосферной части (~50-60 % ночью и 25-45 % днем в минимуме солнечной активности в 2009). Более того, в обоснование включен тот факт, что IRI TEC может быть больше GNSS TEC, хотя очевидно, что это является свидетельством некорректного расчета

IRI TEC. В результате подгонка солнечных индексов проводится, если разница между GNSS TEC и IRI TEC лежит вне диапазона $-3 \leq \Delta \text{TEC} \leq 3$. Скорректированные индексы используются, как драйверы модели IRI2012, и вычисляются N(h)-профиль, hmF2, TEC, foF2. Тестирование проведено прямым сравнением с параметрами, полученными по данным COSMIC и ионозондов. Результаты сводятся к следующему. В спокойных условиях адаптация модели улучшает определение TEC от 10 до 40 % в зависимости от станции, в возмущенных условиях этот диапазон составляет 16-20 %, хотя по конкретным графикам этого не видно. Оценка foF2 улучшается во время возмущений, однако в спокойных условиях иногда приводит к ухудшению результатов, наиболее сильному в низкоширотной области. На средних широтах есть слабое улучшение, но не для всех станций. Этот факт связывается с адаптацией через скорректированные индексы.

Одним из важных приложений является использование TEC для определения foF2. В работе [278] разработана глобальная модель τ GMIST (the global model of ionospheric slab thickness) с помощью разложения в ряды Фурье 11 степени суточного хода, полинома 5 степени для широтной зависимости и в виде линейной функции индекса R12. Сделана попытка по данным 21 ионозонда и TEC(CODE) для 13 станций создать модель для возмущенных условий в рамках упомянутой линейной функции от индекса R12 и постоянства τ в спокойных и возмущенных условиях. Последнее предположение является довольно спорным. Получили, что в среднеширотной зоне модель GMIST улучшает определение foF2 на 14.57% по сравнению с опцией IRI STORM, в низких широтах на 29.73%. В области экваториальных широт модель GMIST оказалась неэффективной. Сами авторы указывают на причины неточности модели: 1) малое число ионозондов, 2) несоответствие предположений 2 и 4 реальной ситуации. Поскольку сделан важный шаг в моделировании τ , необходимо сделать еще несколько замечаний. Не совсем понятно, почему для foF2 использовались месячные медианы, а для TEC среднемесячные значения. Нужно было на графиках привести медианы foF2, чтобы наглядно оценить уровень возмущения. Значения TEC брались через 2 часа, значения foF2 через час, но не указано, какая аппроксимация использовалась для TEC. Не совсем корректно (один день перед возмущением) выбраны спокойные дни. Оценки СКО в 0.1 МГц кажутся слишком оптимистичными. В частности, указывается на конкретный пример для станции Nicosia 12 апреля 2004, когда СКО для модели GMIST было 0.1 МГц, а для опции IRI STORM 0.09 МГц. Однако использование данных различных баз дает другие результаты, представленные на рисунке 6.20. В левой части показано поведение экспериментальных foF2 вместе с медианой, а также представлены значения для модели IRI STORM и значения, рассчитанные с использованием TEC(obs) и $\tau(\text{med})$ для карты JPL. В правой части приведены

соответствующие отклонения от экспериментальных $foF2$ и для сравнения результаты для других глобальных карт.

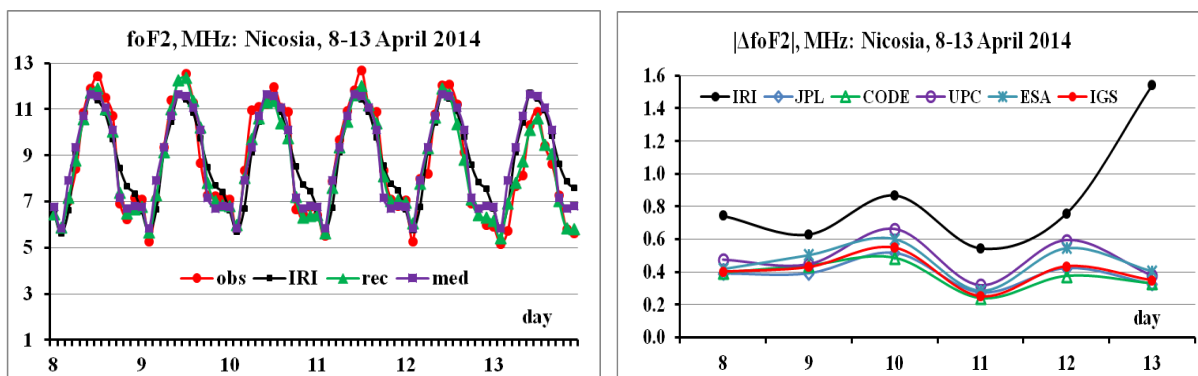


Рисунок 6.20 - Значения $foF2$ для различных способов расчета (левый график) и их отклонения от экспериментальных данных (правый график)

Этот случай относится к возмущенному периоду 11-12.04.2014, т.е. в качестве спокойного дня был выбран день 10.04.2014, хотя для него отклонения $|\Delta foF2|$ больше, чем в предыдущие дни. Кроме того, основной отрицательный отклик ионосферы пришелся на 13.04.2014, обеспечив большее отклонение для модели IRI STORM. Такие же результаты получены для близкой станции Athens.

В любом случае, все эти результаты свидетельствуют о преимуществе экспериментальной медианы $\tau(\text{med})$, однако исследователи продолжают пользоваться параметром $\tau(\text{IRI})$ или $\tau(\text{IRI-Plas})$ [279-281].

В статье [281] сделан краткий обзор предшествующих работ, в которых совместное использование данных GNSS и ионозондов позволяет оценивать $foF2$, и предлагается метод определения $foF2$ по данным TEC без использования информации ионозондов, что должно давать преимущество для регионов, не имеющих ионозондов. Записывается стандартное выражение, в котором в левой части стоит измеряемая величина запаздывания, а в правой части наклонный TEC, дифференциальные сдвиги спутника и приемника, шумовая компонента. Уже в этом выражении делается разделение на ионосферную и плазмосферную части вслед за работой [282]. Ионосферный вклад конвертируется в вертикальный с помощью стандартной функции тонкого слоя в границах от высоты приемника до верхнего уровня, которым является h_{utl} , т.е. граница между верхней ионосферой и плазмосферой. Для получения аналитического решения $N(h)$ -профиль представляется в виде двух функций: β -Чепмен для нижней ионосферы и α -Чепмен для верхней ионосферы. Получено простое выражение для $VIEC = 3.81 \text{ Nm}^2 F_2$ $H_i = 4.72 \times 10^{10} foF2^2 H_i$, где H_i – масштаб высоты профиля. Множитель 3.81 складывается из 1 для нижней ионосферы и ~ 2.81 – для верхней. Таким образом, если известны $VIEC$ и H_i , можно определить $foF2$. Отмечается, что на точность

определения foF2 могут влиять ошибки функции Чепмена вследствие упрощений, вводимых при определении H_i . Предполагается равенство масштабов обеих функций и постоянство по высоте. Возможная неточность оценена с помощью модели IRI для трех пунктов с широтами 0°N, 40°N, 80°N и долготой 106°E в момент UT=14 (LT=21, это ошибка: LT=14) в минимуме (2009) и максимуме (2012). Получено, что во всех случаях различия между foF2(IRI) и значениями для функций Чепмена не превышают 1 МГц. Отмечается, что такая оценка не влияет существенным образом на точность foF2. В правой части остались еще плазмосфера, сдвиги и шумы. Для оценки влияния ошибок каждого фактора выбрали порог в 1 МГц, который представляет типичное СКО, основанное на глобальной эмпирической модели foF2. Последовательная оценка всех факторов, т.е. получение допустимых вариаций значений каждого фактора для достижения точности, превышающей пороговое значение 1 МГц, показала, что: 1) для достижения точности лучше 1 МГц нет необходимости иметь очень точное значение H_i , приемлемой является максимальная неопределенность в ± 23 км, 2) при таком умеренном требовании можно использовать значения H_i из таких моделей, как IRI и NeQuick. Оценка необходимой точности плазмосферной части составила 2.1 TECU в экваториальной области и 5.4 TECU в северном полушарии. Поскольку это достаточно сильное ограничение, плазмосферную часть рассчитывали по модели и вводили в правую часть уравнения с множителем, который являлся неизвестной величиной и определялся с помощью алгоритма фильтра Кальмана. Также даны оценки для сдвигов - 0.7–1.9 ns, при этом точность для передатчиков IGS лучше 0.2 ns, для приемников - 1.5 ns. Метод тестировался по данным трех станций NICO (35.14°N, 33.40°E), Cyprus, STR1 (35.32° W, 149.01°E), Australia, SYOG (69.01°W, 39.58° E), Antarctic в 2009-2012. Две последние станции находятся в южном полушарии. Большим преимуществом модели является возможность определения foF2 с разрешением 30 сек, однако тест проводился по часовым данным. Коэффициент корреляции между рассчитанными предложенным методом значениями foF2(GPS) и данными ионозондов foF2(ION) лежит в диапазоне 0.64-0.9 со средним значением 0.77 для всех станций и лет. Средний сдвиг меньше 0.5 МГц, СКО меньше 1.4 МГц. Для оценки суточных и сезонных вариаций сравнение проведено для медиан в марте, июне, сентябре и декабре 2012. Значение разностей foF2(ION) и foF2(GPS) для всех станций и любого сезона меньше 0.9 МГц с коэффициентом достоверности больше 0.75. Отмечены большие различия для станции STR1 в 2009. Также для сравнения использовались N(h)-профили по данным спутников FORMOSAT-3/COSMIC. Всего удалось получить 151 случай. Для foF2(GPS) СКО=0.44 МГц с коэффициентом достоверности 0.98, для foF2(F/C) СКО=0.71 и коэффициент достоверности 0.86. Наиболее важными являются оценки во время возмущений. В статье [281] выбраны возмущения 7 и 9 марта 2012. Результаты представлены

в виде графиков зависимостей foF2 от времени. Для станций NICO и STR1 получено удовлетворительное соответствие, хотя возмущения были более выражены для foF2(ION), чем для foF2(GPS). Для станции SYOG данных вертикального зондирования не было, но по сравнению с моделью IRI была видна определенная реакция на возмущения.

Интересно сравнить эти результаты с результатами метода [34,245]. На рисунке 6.21 показаны отклонения $|\Delta\text{foF2}|$ значений foF2 для модели IRI и рассчитанных по экспериментальным ТЕС с использованием медианы эквивалентной толщины $\tau(\text{med})$ от foF2(ION) для 4-х месяцев, выбранных в [281], для станции Canberra, которые дали наихудший результат.

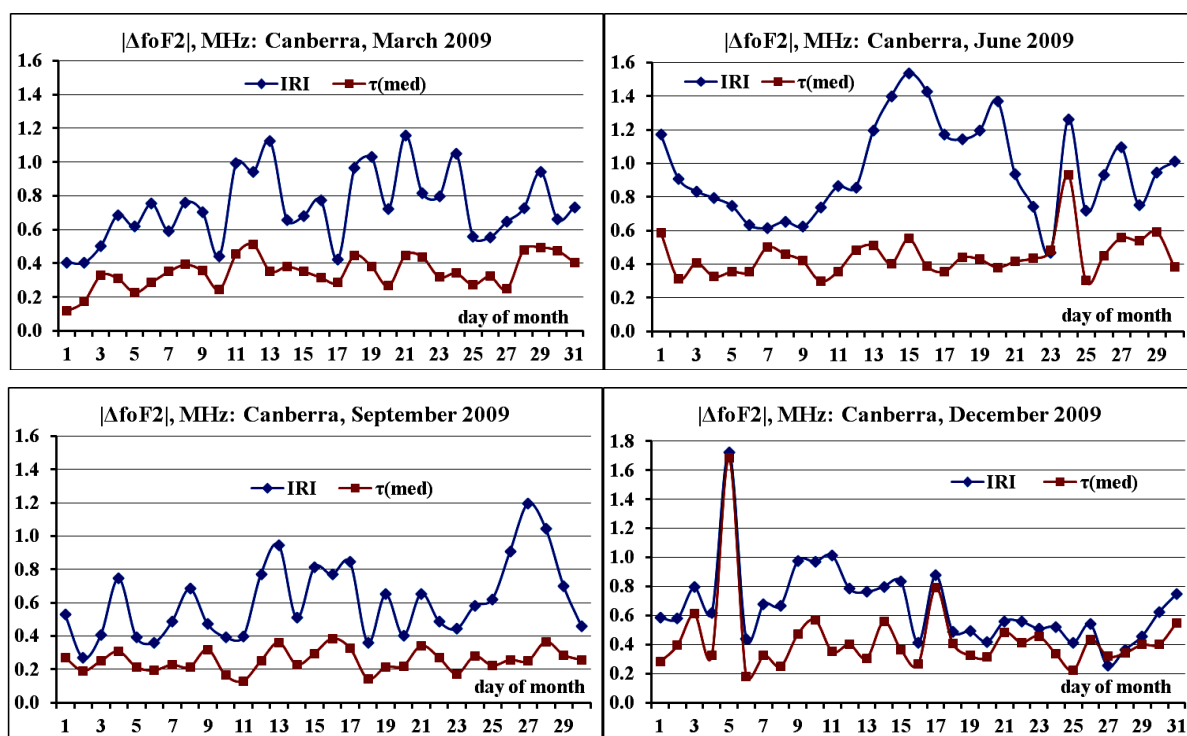


Рисунок 6.21 - Сравнение отклонений $|\Delta\text{foF2}|$ для модели IRI и $\tau(\text{med})$

Количественные оценки приведены в Таблице 6.9 для абсолютных отклонений $|\Delta\text{foF2}|$ и СКО (σ) в МГц и %.

Таблица 6.9. Сравнение точности определения foF2 по модели IRI и с использованием ТЕС.

2012	March		June		September		December	
Canberra	IRI	$\tau(\text{med})$	IRI	$\tau(\text{med})$	IRI	$\tau(\text{med})$	IRI	$\tau(\text{med})$
$ \Delta\text{foF2} $	0.74	0.35	0.96	0.45	0.61	0.25	0.66	0.44
σ , MHz	0.91	0.47	1.15	0.61	0.73	0.32	0.84	0.67
σ , %	19.16	9.93	26.17	13.90	17.63	7.74	16.54	12.95

По данным Таблицы 6.9, для $\tau(\text{med})$ абсолютные отклонения практически везде меньше 0.45 МГц, а СКО - 0.6 МГц, т.е. лучше, чем в методе [281] и для IRI в 1.5-2 раза, что лежит в пределах [34,245]. Выбросы в июне и декабре на рисунке 6.21 связаны с некорректными автоматическими отсчетами, как это видно из рисунка 6.22 на графиках для foF2. Поведение TEC не подтверждает всплески. Эти случаи исправляются при ручной обработке, но при большой статистике это не всегда возможно. Другим способом является контроль с помощью TEC.

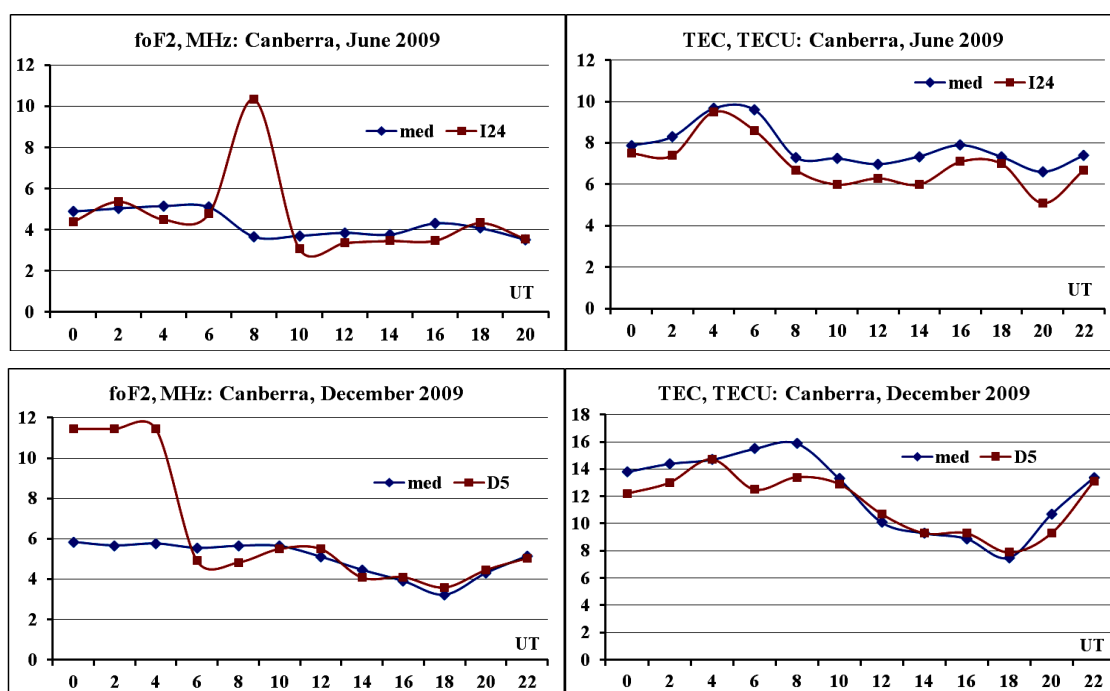


Рисунок 6.22 - Всплески foF2, связанные с некорректными автоматическими отсчетами

В работе [282] построена 3-D модель электронной концентрации (т.е. в координатах широта, долгота, высота) с адаптацией к TEC глобальных карт IGS. Высотная область профиля разбита на 3 части: нижняя ионосфера (50-200 км), верхняя ионосфера (200-1000 км), плазмосфера (1000-2000 км). На данном этапе плазмосферная часть считалась известной в соответствии с работой [283], хотя при выводе основного уравнения ею пренебрегли. В нижней и верхней частях профиля используется модель Чепмена с различными масштабами высот. Для адаптации модели брали значения TEC в 160 точках. Для получения параметров траектории решалась система характеристических уравнений для каждого луча между IGS станцией и спутником. Эти параметры включают: геоцентрические координаты точек пересечения луча и слоев ионосферы, наклонное расстояние между двумя последовательными точками пересечения, геоцентрическую высоту каждой точки

пересечения, зенитный угол спутника в каждой точке. В каждой точке неизвестными являются параметры $NmF2$ и $hmF2$. Уравнение, которое решается, содержит в левой части значение наклонного ТЕС, полученного из вертикального. В правой части стоит выражение для наклонного ТЕС, записанное через сумму произведений N_e на соответствующее приращение по высоте (причем в нем пренебрегли не только плазмосферной частью, но и сдвигами приемника и передатчика). Наверно, это является оправданным, так как, если собирать неизвестные величины вдоль всех траекторий в глобальном масштабе, то получится неразрешимая система, поэтому весь набор неизвестных заменяется двумя сферическими гармоническими функциями для $NmF2$ и $hmF2$. Число неизвестных уменьшается от $2 \cdot k$, умноженное на число траекторий, где k – число точек профиля, до $2(n_{\max}+1)^2$ – число сферических гармонических коэффициентов, $n_{\max}$ – число гармоник. После расчета коэффициентов разложения $NmF2$ и $hmF2$ изображаются в виде карты с пространственным разрешением 2.5° по широте и 5° по долготе и с временным разрешением 2 часа. Для достижения такого пространственного разрешения использовалась степень разложения 15. Это приводит к оценке 256 коэффициентов для каждой карты. Для суточного хода необходимо 12 карт. В глобальном масштабе получается 6144 неизвестных параметров. Результаты сравнивались для одного дня 1 июля 2010 года с данными измерений на спутниках серии COSMIC. Среднее отклонение рассчитанных значений от экспериментальных для $[0,2]$ UT составило 0.70×10^{11} эл/м³ (2.38 МГц) для $NmF2$ ($foF2$), СКО составило 0.76×10^{11} эл/м³ (2.47 МГц). Для $hmF2$ эти цифры составили 40.8 км и 38.3 км. Несмотря на перспективность подхода, результаты пока не обладают преимуществом перед моделью IRI.

В работе [284] связь между $foF2$ и ТЕС использовалась для адаптации модели IRI к значениям $TEC(obs)$ на массиве GPS передатчиков, как и связь между $hmF2$ и ТЕС. Ранние высокие оценки корреляции между $foF2$ и ТЕС были обоснованы тем, что должно существовать определенное соотношение между интегралом функции, рассчитанной по ее области, и абсолютным максимумом этой функции, если она непрерывна и регулярна. $N(h)$ -профиль как функция высоты непрерывен, но регулярность может нарушаться из-за большой изменчивости ионосферы. Наибольший коэффициент корреляции имеет место в дневное время, когда наиболее важным фактором является солнечное излучение. Ночью становится существенным вклад плазмосферной части. Для $hmF2$ связь с ТЕС оказалась более сложной и поэтому предпочли искать соотношение между $MUF(3000)F2$ и ТЕС. Эта зависимость оказалась нелинейной, но ее удалось линеаризовать с помощью перехода к другим единицам измерения. Предложенная схема включала определение матрицы коэффициентов регрессии для связи $foF2$ и ТЕС, $MUF(3000)F2$ и ТЕС для южно-африканского региона по данным 4

ионозондов за 2003-2017 с соответствующими GPS приемниками. Затем, по экспериментальным значениям ТЕС для заданной даты определяются значения f_oF2 и h_mF2 , по которым строятся карты индексов IG_{12eff} и R_{12eff} для расчета параметров f_oF2 и h_mF2 во всей зоне. Тестирование данного подхода было выполнено как по данным 2017 года, который входил в базу для адаптации, так и для 2018 года, который не входил. Для 2017 года тестирование проведено для 6 наиболее интенсивных магнитных бурь и 4 сезонов по 4 спокойных дня в каждом. 2018 год включал 2 месячных периода, один с мощной магнитной бурей, другой со слабой в качестве примера спокойного периода. Что касается f_oF2 , предложенный подход улучшил определение во всех случаях. Во время отрицательных возмущений иногда получались завышенные значения, но это свойственно и методу использования $\tau(med)$. Что касается h_mF2 , сравнение проводилось с опцией Шубина [285]. Для случая 2017 года получено некоторое улучшение для очень сильных возмущений по сравнению с моделью IRI, при умеренных возмущениях нет преимуществ, а в спокойных условиях новый подход ухудшил результат. Для случая 2018 года подтверждено улучшение результатов для f_oF2 , для h_mF2 получены намного худшие результаты. В заключение можно дать несколько количественных оценок точности этой процедуры. Точность оценивалась с помощью СКО, нормированной СКО в %, значений коэффициента корреляции рассчитанных значений с экспериментальными, среднего остатка. Результаты приведены в большом количестве таблиц. Сами авторы сравнили свои оценки $НСКО \approx 7-13\%$ для f_oF2 и h_mF2 с оценками для европейского региона из работы [286], в которой $НСКО \approx 4-5\%$. Однако авторы [286] адаптировали модель IRI к данным ионозондов, а не к значениям f_oF2 и h_mF2 , полученным с использованием ТЕС. В среднем, достигнуто 25 % улучшение определения f_oF2 в спокойных и возмущенных условиях.

6.4. Выводы.

Полное электронное содержание ТЕС ионосферы позволяет выявлять климатологические особенности состояния ионосферы и описывать это состояние во время возмущений. Использование экспериментальных значений ТЕС позволяет увеличить точность определения критических и, соответственно, максимальных применимых частот, в результате адаптации таких эмпирических моделей, как IRI, IRI-Plas, NeQuick, а также определять Nh-профиль ионосферы от ее начала до высот орбит любых спутников. Важным результатом тестирования является вывод о том, что в силу больших различий модельных и экспериментальных значений экспериментальная медиана эквивалентной толщины ионосферы $\tau(med)$ является основным параметром, позволяющим увеличить эту точность. В результате предложен метод определения критической частоты f_oF2 по данным ТЕС с

помощью величины $\tau(\text{med})$.

В результате расчетов показано, что модели IRI-Plas, NeQuick достаточно хорошо соответствуют глобальным картам GIM-IGS, однако ни одна из них не может обеспечить одинаково хорошее соответствие во всех регионах земного шара. Обзор самых последних работ по использованию ТЕС показывает, что глобальные карты GIM-IGS остаются важнейшим источником информации о состоянии ионосферы. Их использование для тестирования локальных моделей ТЕС расширяется. Несмотря на то, что эти карты могут быть альтернативой, большое внимание уделяется модификации модели Klobuchar в связи с ее ролью в позиционировании.

Результаты главы опубликованы в работах [34,81,229,235,237,241,245] и были представлены на международных и всероссийских конференциях [242,244,247].

Заключение

Основной задачей диссертационной работы была разработка и усовершенствование возможностей использования радиофизических методов диагностики ионосферы для определения условий распространения радиоволн в околоземном пространстве.

Главной особенностью, определяющей новизну работы, является совместное использование всех видов ионосферного зондирования (ВЗ, Н, Вн, транс), объединенных в схему, показанную на рис. В1, в задачах распространения радиоволн.

К настоящему времени каждый из перечисленных видов зондирования имел свои нерешенные проблемы, связанные с учетом влияния неоднородностей и недостаточной точностью описания состояния ионосферы, решению которых посвящена диссертация.

Основной измеряемой величиной для всех типов зондирования является время распространения радиоволны от излучателя к приемнику или действующая высота, равная произведению этого времени на скорость света. Если зондирование проводится на массиве частот, то получается основная характеристика – ионограмма, т.е. зависимость действующих высот от частоты, вид которой определяется диапазоном частот и взаимным положением излучателя и приемника. На этой основе удалось реализовать единый подход для всех типов зондирования, заключающийся в: 1) создании общего математического аппарата, 2) разработке полной модели ионосферы, 3) интерпретации большого набора экспериментальных данных.

Математический аппарат включал численные методы, алгоритмы, программы расчета траекторий в неоднородной магнитоактивной ионосферной плазме. Для повышения точности современных эмпирических моделей ионосферы был предложен принцип коррекции, включающий: 1) данные различных типов зондирования, 2) численные расчеты траекторий волн, 3) разработанный коэффициент коррекции. Интерпретация большого набора экспериментальных данных привела к обнаружению большого числа новых явлений.

Все разработанные методы и полученные результаты направлены на повышение точности задания ионосферной информации, необходимой для функционирования различных технологических систем связи.

Использованный подход позволил в рамках **вертикального** зондирования:

- 1) решить уравнения для крутопадающих на ионосферу лучей, которые имеют место при каждом возврате радиоволны в точку излучения,
- 2) разработать и реализовать программный комплекс «Viewer_DPS4», являющийся новым инструментом обработки и анализа данных ионозонда DPS-4, включающим

в себя алгоритмы автоматизированного расчета F-рассеяния и детального анализа отраженных эхо-сигналов,

- 3) разработать и реализовать принципы построения, алгоритмы функционирования нового инструмента dynasonde-21 и соответствующую программу NeXtYZ, позволяющую наиболее точно определять трехмерную структуру распределения электронной концентрации,
- 4) объяснить наблюдения F-рассеяния в экваториальной зоне различием скоростей горизонтального движения плазмы в слоях E и F, что является новым физическим результатом.

Для **наклонного** зондирования использование предложенного принципа коррекции для восстановления Nh-профилей на наклонных трассах различной протяженности показало максимальную близость скорректированной ионосферной модели к реальной ситуации, как в спокойных условиях, так и в период достаточно сильного возмущения.

В рамках **внешнего** зондирования, которое осуществляется со спутников и позволяет определять параметры верхней ионосферы, которые нельзя получить при зондировании с земли, основной проблемой является интерпретация сложных спутниковых ионограмм, связанная с задачей восстановления Nh-профилей верхней ионосферы, осложненной наличием неоднородностей. При решении этой задачи важную роль сыграл расчет профиля внешней ионосферы из спутниковых ионограмм с помощью предложенной процедуры коррекции вдоль траектории спутника, позволивший восстановить трехмерную ионосферу.

Анализ сложных ионограмм ИСЗ Интеркосмос-19 на основе численного моделирования привел к получению уникальных результатов, связанных с наличием ионосферных неоднородностей: на ионограммах внешнего зондирования были обнаружены такие ранее неизвестные следы, как наклонные отражения от Земли, задержанный нижний след, рассеянные и многократные следы, жемчужины, волноводные следы. Получена статистика наблюдений неоднородностей в зонах экваториальной аномалии, среднеширотного провала. Оценены размеры мелких и крупных неоднородностей.

Метод **трансионосферного** зондирования (ТИЗ) обладает большим разнообразием, как по высотам орбит спутников, так и по расположению передающих и приемных систем. Как уже отмечалось, основным экспериментальным материалом являются трансионограммы – набор измеренных действующих расстояний для различных частот, который в зависимости от состояния ионосферы может содержать сложную систему следов (треков). Использование общего подхода к моделированию трансионограмм позволило выявить возможности использования следующих типов орбит спутников: 1) низкоорбитальные (одиночные или группировка), 2) геостационарные, 3) высокоапогейные, 4) система «спутник- спутник».

В случае первого типа орбит отличием от предыдущих исследований является учет отражений от Земли. Проведенный впервые учет этих отражений позволил объяснить наблюдение ЗНС-ионограмм, т.е. ионограмм с задержанным нижним следом, и выявить их широкие диагностические возможности.

Для второго типа орбит предложен метод многочастотного радиопросвечивания, ориентированный на арктический регион. Показаны его преимущества при установке излучателя на спутнике и приеме сигналов на Земле по сравнению с методом внешнего зондирования с низкоорбитальных спутников, в частности, засветка большой широтной зоны.

Третий вариант орбит также обладает преимуществами при использовании в арктическом регионе. Показано, что двух спутников достаточно для круглосуточного наблюдения за российскими регионами. Этот вариант может быть дополнением к первому варианту, для которого на рисунке № в левой части показана схема 4 спутников недавно осуществленного эксперимента «Ионосфера-М», в правой части суточный охват земной поверхности. Видно, что такая схема обеспечивает глобальный мониторинг ионосферы.

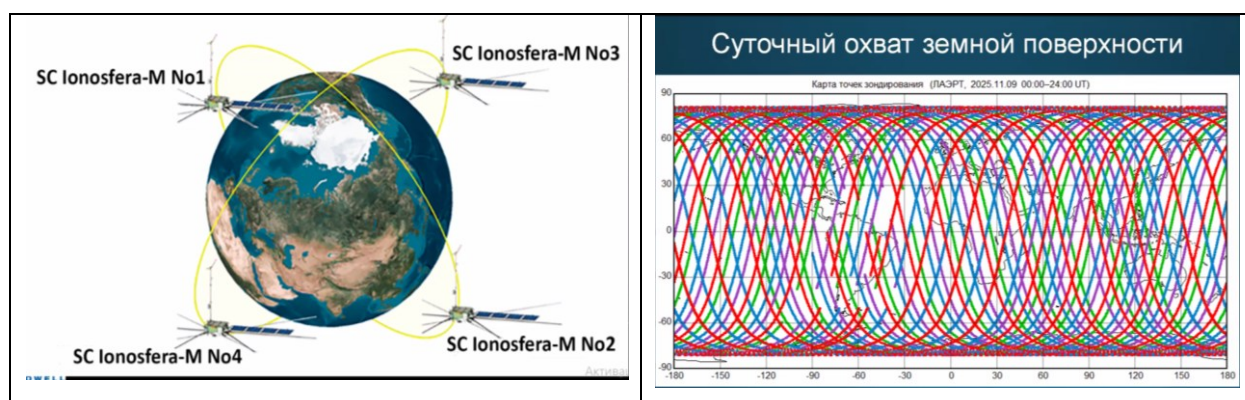


Рисунок 3.1 - Иллюстрация возможностей трансionoсферного зондирования для глобального мониторинга ионосферы на примере эксперимента «Ионосфера-М».

Для четвертого варианта на примере приемника на МКС и бортового ионозонда на КА «Прогресс-М» предложено несколько схем экспериментов, в том числе ТИЗ и метод обратного трансionoсферного радиозондирования (ОТИЗ). Показано, что можно получать параметры не только главного слоя ионосферы F2, но и спорадического слоя Es. Такой подход может быть реализован в готовящемся в 2030 году запуску Российской орбитальной станции РОС.

Особенностью всех случаев является возможность диагностики крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений и мелкомасштабных неоднородностей, направленной на увеличение знаний о параметрах ионосферы с целью создания более точных ионосферных моделей и более точного определения условий распространения

радиоволн.

Определение еще одного параметра ионосферы – полного электронного содержания ТЕС – происходит с помощью приема на земле радиоволн, излучаемых на спутниках всех типов орбит, который является еще одним примером трансionoсферного зондирования. Хотя частоты радиоволн (порядка нескольких ГГц) здесь намного больше частот КВ- радиоволн, эти волны также испытывают при распространении через ионосферу дисперсию, рассеяние, поглощение, что позволяет использовать разработанный подход. Корректировка модели ионосферы с использованием ТЕС позволяет не только определять частоту f_oF_2 , но и восстанавливать N_h -профиль от начальной высоты ионосферы до спутника с орбитой любой высоты от GPS до геостационаров.

Таким образом, совместное использование всех типов зондирования позволяет осуществлять глобальный мониторинг ионосферы и с помощью предложенного подхода определять условия распространения радиоволн в ближнем космическом пространстве.

В заключении автор выражает искреннюю благодарность научному консультанту доценту, д.ф.-м.н. Мальцевой Ольге Алексеевне за постоянную поддержку и внимание, а также всем сотрудникам отдела космических исследований НИИ физики ЮФУ за многочисленные творческие дискуссии и советы при выполнении данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Booker, H. G. The role of acoustic gravity waves in the generation of spread F and ionospheric scintillation / H. G. Booker // J. Atmos. and Terr. Phys. – 1979. – Vol. 41. – P. 501-515.
2. Fejer, B. G. Ionospheric irregularities / B. G. Fejer, M. C. Kelley // Rev. Geophys. Space Phys. – 1980. – Vol. 18, № 2. – P. 401-454.
3. Явление F-рассеяния в ионосфере / В. Н. Гершман, Э. С. Казимировский, В. Д. Кокоуров, Н. А. Чернобровкина. – М.: Наука, 1984. – 141 с.
4. Aarons, J. Global morphology of ionospheric scintillations / J. Aarons // Proc. IEEE – 1982. – Vol. 70. – P. 360-388.
5. Ерухимов, Л. М. О неоднородной структуре верхней ионосферы / Л. М. Ерухимов, О. И. Максименко, Е. Н. Мясников // Ионосферные исследования. – 1980. – № 30. – С. 27-48.
6. Szuszczeicz, E.P. Theoretical and experimental aspects of ionospheric structure: a global perspective and irregularities / E. P. Szuszczeicz // Radio Sci. – 1986. – Vol. 21, № 3. – P. 351-362.
7. Гершман, Б. Н. Волновые явления в ионосфере и космической плазме / Б. Н. Гершман, Л. М. Ерухимов, Ю. А. Яшин. – М.: Наука, 1984. – 392 с.
8. Shkarofsky, I. P. Generalized turbulence space correlation and wave-number spectrum-functions pairs / I. P. Shkarofsky // Canad. J. Phys. – 1968. – Vol. 46. – P. 2133–2153.
9. Иванов, В. П. Экспериментальные характеристики перемещающихся волновых возмущений ионосферы по данным обсерватории Калининграда / В. П. Иванов, В. Л. Карвецкий, Н. А. Коренькова // Геомагнетизм и аэрономия. – 1982. – Т. 22, № 6. – С. 1023-1024.
10. From, W. R. Mid-latitude spread-F structure / W. R. From, D. H. Meehan // J. Atmos. Terr. Phys. – 1988. – Vol. 50, № 7. – P. 629–638.
11. Advancing Digisonde Technology: The DPS-4D / B. W. Reinisch, [et al.] // Radio Sounding and Plasma Physics, American Institute of Physics, AIP Conference Proceedings, – NY: 2008. – P. 974.
12. Zabotin, N.A. NeXtYZ: Three-dimensional electron density inversion for dynasonde ionograms / N. A. Zabotin, J. W. Wright, G. A. Zhabankov // Radio Sci. – 2006. – v.41. – RS6S32, doi:10.1029/2005RS003352.
13. Заботин, Н. А. Современные принципы ионосферного радиозондирования, реализованные в Диназонде 21 / Н. А. Заботин, Дж. В. Райт, Г. А. Жбанков // Труды РРВ-22

(22-26 сентября 2008 г., Ростов-на-Дону - п. Лоо). – Т. 2. – С. 41-44.

14. Сетевой ионозонд для определения пространственно-временного распределения параметров ионосферы земли / С. А. Колесник, А. А. Колмаков, В. Т. Сарычев, Р. К. Хаитов // Гелиогеофизические исследования. – 2013. – Вып. 4. – С.90-100.

15. Кузьмин, А. В. Комплекс мониторинга ионосферы на базе ионозонда «Авгур-Д» / А. В. Кузьмин, В. М. Кучерина, А. Н. Ражев // Гелиогеофизические исследования. – 2013. – Вып. 4. – С.111–119.

16. Croft, T. A. Exact Ray Calculations in a Quasi-Parabolic Ionosphere with no magnetic Fields / T. A. Croft, H. Hoogassian // Radio Sci. – 1968. – Vol. 3, № 1. – P. 69-74.

17. Гершман, Б. Н. Динамика ионосферной плазмы / Б. Н. Гершман. – М.: Наука, 1974. – 256 с.

18. Ландау, Л. Д. Механика/ Л.Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1988. – 216 с.

19. CCIR. Supplement to report 252-2. – Genova: 1982. – 38 p.

20. Кияновский, М. П. Метод рефракционного интеграла и его применение к расчету радиотрасс / М. П. Кияновский, Л. А. Зырянова // Техника средств связи. Серия СС. – М.: 1987. – вып. 5. – С. 4-15.

21. Кравцов, Ю. А. Геометрическая оптика неоднородных сред / Ю. А. Кравцов, Ю. И. Орлов. – М: Наука, 1980. – 304 с.

22. Лукин, Д. С. Применение метода характеристик для решения на ЭВМ задач распространения электромагнитных волн в неоднородных анизотропных средах / Д. С. Лукин, Ю. Г. Спиридонов // "Лучевое приближение и вопросы распространения радиоволн". Ред. М. П. Кияновский, – М.: Наука, 1971. – С. 582-600.

23. Assimilation of GIRO data into a real-time IRI / I. A. Galkin, B. W. Reinisch, X. Huang, D. Bilitza // Radio Science. – 2012. – Vol. 47. – RS0L07. – P. 1-10.

24. Pilot ionosonde network for identification of traveling ionospheric disturbances / B. Reinisch, I. Galkin, A. Belehaki, [et al.] // Radio Science. – 2018. – Vol. 53 – P. 365-378.

25. Рябцев, В. В. Расчет параметров ионосферы с учетом высокоширотной корректировки и возможности возникновения спорадического слоя / В. В. Рябцев // Телекоммуникации и транспорт. – 2009. – № 59. – С. 23-27.

26. Соломенцев, Д. В. Трехмерная ассимиляционная модель ионосферы для европейского региона / Д. В. Соломенцев, Б. В. Хаттатов, А. А. Титов // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2013. – Т. 53, № 1. – С. 78-90.

27. Коррекция модели NeQuick в высокоширотном регионе с использованием данных наклонного полного электронного содержания / Д. С. Котова, Б. С. Оводенко, М. В.

- Клименко, [и др.] // “Physics of Auroral Phenomena”. Proc XL Annual Seminar, Apatity. – 2017. – P. 120-124.
28. Assimilation procedures for updating ionospheric profiles below the F2 peak / L. F. McNamara, M. J. Angling, S. Elvidge, [et al.] // Radio Sci. – 2013. – Vol. 48 – P. 143–157. – DOI:10.1002/rds.20020.
29. Assimilation of autoscaled data and regional and local ionospheric models as input sources for real-time 3-D International Reference Ionosphere modeling / M. Pezzopane, M. Pietrella, A. Pignatelli, [et al.] // Radio Sci. – 2011. – Vol. 46. – RS5009. – DOI:10.1029/2011RS004697.
30. Данилкин, Н. П. Коррекция ионосферных моделей непосредственными измерениями / Н. П. Данилкин, Н. Г. Котонаева, М. Р. Азизбаев // Электросвязь. – 2007. – №7. – С. 51–54.
31. Адаптация моделей ионосферы по данным ионозондов ВЗ и приемников ГНСС для задач моделирования распространения декаметровых радиоволн / А. В. Ойнац, Ю. В. Ясюкевич, А. М. Веснин, [и др.] // Труды конференции РРВ–26, 1–6 июля 2019, Казань. – Т.1. – С.251–255.
32. Моделирование z-образного возмущения на луче Педерсена дистанционно-частотной характеристики наклонного зондирования с использованием моделей ионосферы / А. Г. Ким, С. Н. Пономарчук, Г. В. Котович, Е. Б. Романова // Солнечно-земная физика. – 2016. – Т. 2, № 4. – С. 43-53.
33. Davies, K. Studying the ionosphere with the Global Positioning System / K. Davies, G. K. Hartmann // Radio Science. – 1997. – Vol. 32, № 4. – P. 1695-1703.
34. Жбанков, Г. А. Полное электронное содержание ионосферы. Условия распространения радиоволн / Г. А. Жбанков, О. А. Мальцева // LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, Germany: 2013. – 153 p. – ISBN: 978-3-659-48571-8
35. Hervás, M. Ionospheric Narrowband and Wideband HF Soundings for Communications Purposes: A Review / M. Hervás, P. Bergadà, R. M. Alsina-Pagès // Sensors. – 2020. – Vol. 20, № 2486. – P. 1-27.
36. Госсард, Э. Волны в атмосфере / Э. Госсард, У. Хук. – М.: Мир, 1978. – 574 с.
37. Adey, W. R. Electromagnetics in biology and medicine / W.R. Adey // In: Modern Radio Science 1993. – Oxford: 1993. – P. 231-249.
38. Szuszczewicz, E. P. Morphology and phenomenology of ionospheric F-region irregularities and implication to users application: a review / E. P. Szuszczewicz // Artificial satellites. – 1987. – Vol. 22, № 1. – P. 143-166.

39. Искусственная ионосферная турбулентность / Л. М. Ерухимов, С. А. Метелев, Е. Н. Мясников, Н. А. Митяков, В. А. Фролов // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1987. – Т. 30, № 2. – С. 208-225.
40. Проблемы турбулентности верхней ионосферы и искусственная ионосферная турбулентность / А. Ф. Беленов, Л. М. Ерухимов, Е. Н. Мясников, Н. А. Митяков, В. А. Фролов // В кн.: Неустойчивости и волновые явления в системе ионосфера-термосфера. – Горький: ИПФАН, 1989. – С. 132-144.
41. Измерение объемных характеристик среднемасштабных волновых возмущений в ионосфере / К. Н. Васильев, В. И. Дробжев, [и др.] // Ионосфера и солнечно-земные связи. – А.-А.: "Наука" КазССР, 1977. – С. 3-25.
42. Evans, J. V. Travelling ionospheric disturbances, detected by UHF angle-of-arrival measurements / J. V. Evans, R. H. Wand // J. Atmos. Terr. Phys. – 1983. – Vol.45, № 4. – P. 255-265.
43. Построение эмпирической модели фоновых волновых возмущений среднеширотной ионосферы. / Отчет о НИР. Научн. рук. В.И. Дробжев, А.Ф. Яковец. – А.-А.: ИИ АН КазССР, 1988. – 256 с.
44. Дэвис, К. Радиоволны в ионосфере / К. Дэвис. – М.: Мир, 1973. – 503 с.
45. Гинзбург, В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме / В. Л. Гинзбург. – М.: Наука, 1967. – 684с.
46. Coleman, C. J. Point-to-point ionospheric ray tracing by a direct variational method / C. J. Coleman //Radio Science. – 2011. – Vol.46. – № 5.
47. Booker, H. G. The role of acoustic gravity waves in the generation of spread F and ionospheric scintillation / H. G. Booker // J. Atmos. and Terr. Phys. – 1979. – Vol. 41. – P. 501-515.
48. Вертоградов, Г. Г. Комплексные исследования ионосферного распространения декаметровых радиоволн на трассах разной протяженности. / Г. Г.Вертоградов. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. – Ростов-на-Дону. 2007. – 432 с.
49. Жбанков, Г. А. Особенности решения лучевых уравнений для крутопадающих на ионосферу траекторий / Г. А. Жбанков // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2016. – № 2 (190). – С. 86-90.
50. Studying Morphological Characteristics of Traveling Ionospheric Disturbances with the Use of Near-Vertical Ionospheric Sounding Data / V. I. Kurkin, O. A. Laryunin, A. V. Podlesny, [et al.] // Atmospheric and Oceanic Optics, – 2014. – Vol. 27, № 4. – P. 303–309. – DOI: 10.1134/S1024856014040095.

51. Henon, M. The applicability of the third integral of motion: some numerical experiments / M. Henon, C. Heiles // *Astron. J.* – 1964. – Vol. 69, № 1. – P. 73-79.
52. Лихтенберг, А. Регулярная и стохастическая динамика / А. Лихтенберг, М. Либерман. – М.: Мир, 1984. – 528 с.
53. Chirikov, B. V. A universal instability of many dimensional oscillator systems. / B. V. Chirikov // *Physics Report.* – 1979. – Vol.52, № 5. – P. 263-379.
54. Жбанков, Г. А. Сравнительный анализ численных методов, применимых для расчета траекторных характеристик КВ-радиотрасс / Г. А. Жбанков, М. М. Анишин // *Техника радиосвязи.* – 2016. – Вып. 4 (31). – С. 41–51.
55. Бордовицина, Т. В. Современные численные методы в задачах небесной механики / Т. В. Бордовицина. – М.:Наука, 1984. – 135 с.
56. Fehlberg, E. Classical fifth-, sixth-, seventh-, and eighth order Runge-Kutta formulas with step size control / E. Fehlberg // *Computing* – 1969. –Vol. 4. – P. 93-106.
57. Fehlberg, E. Low-order classical Runge-Kutta formulas with step size control and their applications for same heat transfer problem / E. Fehlberg // *Computing.* – 1970. –Vol. 6. – P. 61-71.
58. Хайпер, Э. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений / Э. Хайпер, С. Нёрссетт, Г. Ваннер. – М.: Мир, 1990. – 512 с.
59. Bulirsch, R. Fehlerabschazunger und Extrapolation mit ratioalen-Funktionen bei Verfahren vom Richardson-Typus / R. Bulirsch, J. Stoer // *Num. Math.* –1964. – Vol. 6. – P. 413-427.
60. Хемминг, Р. В. Численные методы для научных работников и инженеров / Р.В. Хемминг. Пер с англ.; под редакцией Р. С. Гутера – М.: Наука. Гл.ред.физ.-мат.лит., 1968. – 203 с.
61. Romberg, W. Verlinfachte numerische Integration / W. Romberg // *Noteke Vid. Selsk Forhdl.* – 1955. – Vol.28. – P. 30-36.
62. Deuflhard, P. Order and step size control in extrapolation methods. / P. Deuflhard // *Num. Math.* – 1983. – V.41. – P.399-422.
63. Ортега Дж. Введение в численные методы решения дифференциальных уравнений / Дж. Ортега, У. Пул. Пер. с англ.; под ред. А.А. Абрамова – М.: Наука. Гл.ред.физ.-мат.лит., 1986. – 288 с.
64. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений / под ред. Дж. Холла, Дж. Уатта – М.: Мир, 1979. – 312 с.
65. Gear, C. W. The automatic integration of ordinary differential equations / C. W. Gear // *Communications of the ACM.* – Vol. 14, № 3. – P. 176-179.

66. The International Reference Ionosphere 2012 – a model of international collaboration / D. Bilitza, D. Altadill, Y. Zhang, [et al.] // J. Space Weather Space Clim. – 2014. – Vol. 4. – A07. – DOI: 10.1051/swsc/2014004.
67. Новый подход к решению задачи повышения точности GPS-позиционирования / Н. П. Данилкин, Г. А. Жбанков, Н. Г. Котонаева, В. Б. Лапшин // Гелиогеофизические исследования. – 2019. – № 22. – С. 1-13.
68. Nickisch, L. J. Practical applications of Haselgrove's equations for HF systems / L. J. Nickisch // Radio Science Bulletin. – 2008. – N325. – P.36-48.
69. Pereyra, V. Solving two-point seismic ray tracing problems in a heterogeneous medium / V. Pereyra, W. H. K. Lee, H. B. Keller // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1980. – Vol. 70. – P. 79-99.
70. Um, J. A fast algorithm for two-point seismic ray tracing / J. Um, C. Thurber // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1987. – Vol. 77, № 3. – P. 972-986.
71. Prothero, W. A. A fast, two-point, three-dimensional raytracing algorithm using a simple step search method / W. A. Prothero, W. J. Taylor, J. A. Eickemeyer // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1988. – Vol. 78, № 3. – P. 1190-1198.
72. Moser, T. J. Ray bending revisited / T. J. Moser, G. Nolet, R. Snieder // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1992. – V. 82, №1. – P. 259-288.
73. Koketsu, K. Pseudo-bending method for three-dimensional seismic ray tracing in a spherical earth with discontinuities / K. Koketsu, S. Sekine // Geophysical Journal International. – 1998. – Vol. 132. – № 2. – P. 339-346.
74. Application of the nudged elastic band method to the point-to-point radio wave ray tracing in IRI modeled ionosphere / I. A. Nosikov, M. V. Klimenko, P. F. Bessarab, G. A. Zhbankov // Advances in Space Research. – 2017. – Vol. 60, № 2. – P. 491–497. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2016.12.003>
75. Generalized Force Approach to Point-to-Point Ionospheric Ray Tracing and Systematic Identification of High and Low Rays / I. Nosikov, M. Klimenko, G. Zhbankov, [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2020. – Vol. 68, № 1. – P. 455-467. – DOI: 10.1109/TAP.2019.2938817
76. Bóna, A. Fermat's principle for seismic rays in elastic media / A. Bóna, M. A. Slawinski // Journal of applied geophysics. – 2003. – V.54. – №3. – P. 445-451.
77. Котова Д. С. Влияние выбора модели среды для решения задачи распространения КВ-радиоволн / Д. С. Котова, В. Е. Захаров, М. В. Клименко, В. В. Клименко // XXIV Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн », 29

июня-05 июля 2014 г. :[сб. докл]: в 4 т./ редкол.: Д.С. Лукин [и др.]. – Иркутск: ИСЗФ СОРАН. – 2014. – Т. 4. – С. 121–125.

78. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions / D. Bilitza, D. Altadill, V. Truhlik, [et al.] // *Space Weather*. – 2017. – Vol.15. – P. 418-429. DOI: 10.1002/2016SW001593.

79. Gulyaeva, T. L. Towards ISO Standard Earth Ionosphere and Plasmasphere Model / T. L. Gulyaeva, D. Bilitza // In: "New Developments in the Standard Model", – NOVA Publisher, 2012. – P. 1-39.

80. TEC proxy index of solar activity for the International Reference Ionosphere IRI and its extension to Plasmasphere IRI-PLAS model / T.L. Gulyaeva, F. Arikan, L. Poustovalova, U. Sezen // *Int. J. Sci. Eng. Applied Sci.* – 2017. – Vol. 3, № 5. – P. 144-150.

81. Maltseva, O. A. Advantages of the new model of IRI (IRI-Plas) to study ionospheric environment / O. A. Maltseva, G. A. Zhibankov, N. S. Mozhaeva // *Advances in Radio Science*. – 2013. – Vol.11. – P. 307–311. – DOI:10.5194/ars-11-1-2013.

82. Leitinger, R. An improved bottomside for the ionospheric electron density model NeQuick / R. Leitinger, M. L. Zhang, S. M. Radicella // *Annals of Geophysics*. – 2005. – Vol. 48, № 3. – P. 525-534.

83. Nava, B. // A new version of the NeQuick ionosphere electron density model / B. Nava, P. Coisson, S. M. Radicella // *J. of Atmos. and Solar-Terr. Physics*. – 2008. – Vol. 70. – P. 1856-1862. – DOI: 10.1016/j.jastp.2008.01.015.

84. Radicella, S. M. The NeQuick model genesis, uses and evolution / S. M. Radicella // *Annals of Geophysics*. – 2009. – Vol. 52, №3/4. – P. 417–422.

85. Михайлов, А. В. Описание и пробная эксплуатация системы мониторинга и долгосрочного прогноза фоновое состояние ионосферы (SIMP-1) / А. В. Михайлов. Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, 2010 – 123 с.

86. Лещинская, Т. Ю. Модель SIMP-1: картирование месячных медиан foF2 по северному полушарию / Т. Ю. Лещинская, В. В. Михайлов // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2016. – Т. 56, № 6. – С. 772-780.

87. Hunsucker, R. D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: a review / R. D. Hunsucker // *Rev. Geophys. Space Phys.* – 1982. – Vol. 20, № 2. – P. 293-315.

88. Григорьев, Г. И. Акустико-гравитационные солитоны в атмосфере Земли (обзор) / Г.И. Григорьев // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. – 1999. – Т. 42, № 1. – С. 3-25.

89. О форме спектра неоднородностей высокоширотной ионосферы / Л. М. Ерухимов, В. И. Косолапенко, А. М. Лернер, Е. Н. Мясников // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1981. – Т. 24, № 5. – С.524-528.
90. Самарский, А. А. Численные методы / А. А. Самарский, А. В. Гулин. – М.: Наука, 1989. – 432 с.
91. Калиткин, Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
92. Трансионосферное радиозондирование – последовательность ионограмм при одном прохождении ИСЗ над наземной станцией / Н. П. Данилкин, Г. А. Жбанков, С. В. Журавлев, Н. Г. Котонаева // Гелиогеофизические исследования. – 2012. – № 2. – С. 14-22.
93. Барабашов, Б. Г. Математическая модель пространственного поля декаметровых радиоволн / Б. Г. Барабашов, М. М. Анишин, Г. А. Жбанков // Труды НИИР. – 2004. – С. 172-177.
94. Барабашов, Б. Г. Трехмерная модель поля ВЧ радиоволн / Б. Г. Барабашов, М. М. Анишин, Г. А. Жбанков. // Антенны. – 2004. – № 12. – С. 70-74.
95. Ionosphere as a Medium of Radio Wave Propagation in Different Applied Tasks / V. V. Klimenko, A. T. Karpachev, G. A. Zhbankov [et al.] // 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP). Kazan, July 1–6, 2019. – В сборнике: Труды XXVI Всероссийской открытой научной конференции. В 2-х томах. – Казанский (Приволжский) федеральный университет (Казань) : 2019. – Т. I. – Р. 117-120.
96. Применение метода подталкивания упругой нити в задачах радиосвязи и сейсмологии / И. А. Носиков, М. В. Клименко, П. Ф. Бессараб, Г. А. Жбанков // VII международная конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений», с. Паратунка, Камчатский край, 29 августа - 2 сентября 2016 г. – Тезисы докладов – Петропавловск-Камчатский : 2016. – С. 115-120.
97. Investigation of optical path functional for high and low ionospheric radio rays / I. A. Nosikov, M. V. Klimenko, P. F. Bessarab, G. A. Zhbankov // 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference, URSI AP-RASC 2016 Seoul, 21-25 августа 2016 г. – В сборнике: 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference, URSI AP-RASC 2016 – Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. : 2016. – Р. 1317-1320. – DOI: [10.1109/URSIAP-RASC.2016.7601186](https://doi.org/10.1109/URSIAP-RASC.2016.7601186).
98. Применение метода подталкивания упругой нити для расчета радиотрасс волн КВ-диапазона в модельной ионосфере / И. А. Носиков, П. Ф. Бессараб, М. В. Клименко, Г. А. Жбанков, О. С. Рубцов // 11-я конференция «Физика плазмы в Солнечной системе», ИКИ РАН, 15-19 февраля 2015 г. – Тезисы докладов – Москва : 2016. – С. 85.

99. Применение прямого вариационного метода поиска верхних и нижних лучей в задаче расчета кв-радиотрасс в ионосфере / И. А. Носиков, М. В. Клименко, П. Ф. Бессараб, Г. А. Жбанков // XV Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». – В сб.: «Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике» Труды XV Конференции молодых ученых. – Иркутск : 2017. – С. 129-131.
100. Модельное воспроизведение ионосферной неоднородности, наблюдавшейся 15 марта 2015 года сетью ионозондов наклонного зондирования ЦКП «Ангара» / Е. Р. Сомина, И. А. Носиков, М. В. Клименко [и др.] // VIII международная конференция «Волны в неоднородных средах и интегрируемые системы» – В сборнике: «Волны в неоднородных средах и интегрируемые системы. Материалы VIII международной конференции». Калининград, 2019. – С. 27-32.
101. Appleton, E. V. Some notes on wireless methods of investigating the electrical structure of the upper atmosphere / Appleton, E. V. // Proc. Phys. Soc. – London, 1930 – Vol. 42. – P. 321–339.
102. Titheridge, J. E. Ionogram analysis with the generalized program POLAN / J. E. Titheridge // Rep. UAG-93, http://www.ips.gov/au/IPSHosted/INAG/uag_93/uag_93.html, World Data Cent. for Sol. Terr. Phys., Boulder, Colo, 1985.
103. Reinisch, B. W. Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms: 3. Processing of bottomside ionograms / B. W. Reinisch, X. Huang // Radio Sci. – 1983. – Vol. 18. – P.477-492.
104. Autoscala: an Aid for Different Ionosondes / M. Pezzopane, C. Scotto, Ł. Tomasik, I. Krasheninnikov // Acta Geophysica. – 2009. – Vol. 58, № 3. – P. 513-526. – DOI: 10.2478/s11600-009-0038-1.
105. Global Assimilation of Ionospheric Measurements (GAIM) / R. W. Schunk [et al.] // Radio Sci. – 2004. – V. 39. – RS1S02. – DOI:10.1029/2002RS002794.
106. Development of the Global Assimilative Ionospheric Model / C. G. Wang, Hajj X. Pi, I. G. Rosen, B. Wilson // Radio Sci. – 2004. – V.39. – RS1S06. doi:10.1029/2002RS002854.
107. An ionospheric forecasting system / B. Khattatov, M. Murphy, M. Gnedin [et al.] // Annual Meeting of Institute of Navigation, Long Beach, Calif., – Sept. 2004.
108. Пономарчук, С. Н. Исследование особенностей возвратно-наклонного зондирования ионосферы на базе ЛЧМ-ионозонда / С. Н. Пономарчук, В. И. Куркин, М. С. Пензин // Солнечно-земная физика. 2017. №. 3. С. 61-69. DOI: <https://doi.org/10.12737/szf-33201706>

109. The New Digisonde for Research and Monitoring Applications / B. W. Reinisch, I. A. Galkin, G. M. Khmyrov [et al.] // Radio Sci. – 2009. – V. 44. – RS0A24. – DOI:[10.1029/2008RS004115](https://doi.org/10.1029/2008RS004115)
110. Advancing digisonde technology: The DPS-4D / B. W. Reinisch, M. Mendillo, G. M. Khmyrov [et al.] // AIP Conf. Proc. – 2008. – V. 974. – P. 127-143. – DOI:10.1063/1.2885022
111. Жбанков, Г. А. Восстановление трехмерного распределения электронной концентрации по ионограммам dynasonde-21. / Г. А. Жбанков, Н. А. Заботин // Изв. ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2009. – № 2. – С. 52-56.
112. Spatial Effects of Multiple Scattering of HF Signals in the Ionosphere: Theory and Experiment / N. A. Zabotin, J. W. Wright, A. J. Gasiewski, G. A. Zhbankov // XXIX General Assembly of the URSI (Chicago, Illinois, USA, August 07-16, 2008). – В сб.: «Proc. of the XXIX General Assembly of the URSI». – URSI : 2008. – P. 234.
113. Сетевой ионозонд для определения пространственно-временного распределения параметров ионосферы Земли / С. А. Колесник, А. А. Колмаков, В. Т. Сарычев, Р. К. Хаитов // Гелиогеофизические исследования. – 2013. – Вып. 4. – С. 90-100.
114. Жбанков, Г. А. Разработка методик расчетов N(h)-профилей ионосферы на основе данных ионограмм вертикального зондирования / Г. А. Жбанков // Техника радиосвязи. – 2020. – Вып. 3(46). – С. 7–18.
115. Жбанков, Г. А. Коррекция моделей ионосферы по данным сети наземных ионозондов / Г. А. Жбанков, П. Ф. Денисенко, В. В. Соцкий // Геомагнетизм и аэрономия. – 2019. – Т. 59, № 6, – С. 750–758. – DOI: [10.1134/S0016794019060154](https://doi.org/10.1134/S0016794019060154)
116. Благовещенский, Д. В. Реальные и расчетные ионограммы НЗИ на КВ радиотрассах во время магнитной бури 7-8 сентября 2017 года / Д. В. Благовещенский, Г. А. Жбанков, О. А. Мальцева // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2018. – Т. 61, № 12. – С. 991–1004.
117. Titheridge, J. E. Model results for the daytime ionospheric E and valley regions / J. E. Titheridge // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. – 2003. – Vol. 65. – P. 129–137.
118. Руководство по ионосферным, магнитным и гелиогеофизическим наблюдениям. Часть I. Ионосферные наблюдения. РД 52.26.817-2015. – Обнинск, 2015. – 209 с.
119. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Prof_Iono» («Восстановление ионосферного профиля по ионограмме») № RU 2012618611 от 21.09.2012 г. Заявка № 2012616501 от 27.07.2012. / Г. А. Жбанков.
120. The digisonde portable sounder – DPS. Technical manual. / Reinisch B. [et al.]. University of Massachusetts Lowell. Center for Atmospheric Research, 2007. Version 4.3. – 404 p.

121. Жбанков, Г. А. Программный комплекс "Viewer_DPS4" – инструмент обработки и анализа данных ионозонда DPS-4 / Г. А. Жбанков, М. М. Анишин, В. А. Телегин // Техника радиосвязи. – 2022. – Вып. 2 (53). – С. 53-65.
122. F-рассеяние в среднеширотной ионосфере по данным ионозонда DPS-4 / В. А. Панченко, В. А. Телегин, В. Г. Воробьев [и др.] // Геомагнетизм и аэрономия. – 2018. – Т. 58, № 2. – С. 241-249. – DOI: [10.7868/S0016794018020104](https://doi.org/10.7868/S0016794018020104)
123. Телегин, В.А. Исследование F-рассеяния по данным московского ионозонда DPS-4 / Телегин В.А., Панченко В.А., Жбанков Г.А. // XXVII Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн» (РРВ'2021), БФУ, Калининград, 2021. – В сб.: «Труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн» (РРВ'2021)» – Калининград : 2021. – Т. 2 – С. 287-293 – ISBN 978-5-9971-0650-8
124. Investigation of the Small-scale Irregularities in F-region of the Mid-latitude Ionosphere by Radioprobing and Radiolocation / V. A. Telegin, N. Yu. Romanova, G. A. Zhbakov [et al.] // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW-2021), Divnomorskoe, 28 июня - 02 июля 2021 г. – В сборнике : 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). Conference Proceedings. – IEEE : 2021. – P. 341-344. – DOI: [10.1109/RSEMW52378.2021.9494052](https://doi.org/10.1109/RSEMW52378.2021.9494052).
125. Автоматизированное определение характеристик F-рассеяния по данным сетевых ионозондов / В. А. Телегин, В. А. Панченко, Г. А. Жбанков, В. И. Рождественская // XIV Всероссийская Открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", 2016, ИКИ РАН. – Сборник тезисов докладов. – Москва : 2016. – С.410.
126. Характеристики F-рассеяния и их связь с уровнем магнитной активности в средних широтах / В. А. Телегин, Г. А. Жбанков, В. А. Панченко [и др.] // Physics of Auroral Phenomena. – 2016. – Т. 39, № 1. – С.127-129.
127. Автоматизированная обработка данных F-рассеяния / В. А. Телегин, В. А. Панченко, Г. А. Жбанков, В. И. Рождественская // Physics of Auroral Phenomena. – 2016. – Т. 39, № 1. – С. 130-133.
128. Разработка алгоритма автоматизированного определения F-рассеяния по данным станции вертикального зондирования DPS-4 (Москва) / В. А. Телегин, Г. А. Жбанков, В. А. Панченко, В. И. Рождественская // Научно-методический сборник ЦНИИ ВКО. – 2016. – № 2. – С. 215-220.
129. Сопоставление направления дрейфа с ориентацией поперечной анизотропии, рассчитанной для разных высот F-области ионосферы / Н. Ю. Романова, В. А. Телегин, В. А. Панченко, Г. А. Жбанков // Материалы 21-й Международной конференции «Современные

проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – Москва: ИКИ РАН, 2023. – С. 322. – DOI 10.21046/21DZZconf-2023a

130. Взаимосвязь дрейфа среднемасштабных неоднородностей и ориентации поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей в F-области среднеширотной ионосферы. / Н. Ю. Романова, В. А. Телегин, В. А. Панченко, Г. А. Жбанков // Геомагнетизм и аэрономия. – 2022. – Т. 62, № 2. – С. 211–226. – DOI: 10.31857/S0016794022020134

131. Результат сопоставления ориентации поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей и направления дрейфа в F-области над Московским регионом (в период январь–март 2012 г.) / Н. Ю. Романова, В. А. Телегин, В. А. Панченко, Г. А. Жбанков // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2022. – Т. 86, № 3. – С. 393-400. – DOI: 10.31857/S0367676522030206.

132. Anisotropy of ionospheric irregularities determined from the amplitude of satellite signals at a single receiver / E. D. Tereshchenko, B. Z. Khudukon, M. O. Kozlova, and T. Nygrén // Ann. Geophys. – 1999. – V. 17, No. 4. – P. 508-518.

133. Updating DPS-4 ionosonde by ionospheric drift measurements: the LocalDrift software package / G. A. Zhabankov, O. A. Maltseva, V. A. Telegin, V. A. Panchenko // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW-2021), Divnomorskoe, 28 июня – 02 июля 2021 г. В сборнике : 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). Conference Proceedings. – IEEE : 2021. – P. 337-340. – DOI: [10.1109/RSEMW52378.2021.9494072](https://doi.org/10.1109/RSEMW52378.2021.9494072).

134. Телегин, В. А. Алгоритм автоматического определения уширения ионограмм в F2 области / В. А. Телегин, Г. А. Жбанков, В. А. Панченко // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем ("РАДИОИНФОКОМ-2024") Москва, 18–22 ноября 2024 г. – В сборнике: Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем ("Радиоинфоком-2024"). Сборник научных статей по материалам VIII Международной научно-практической конференции. – МИРЭА, Российский технологический университет – Москва : 2024. – С. 779-784.

135. О сходстве и различии между ориентацией поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей и направлением дрейфа плазмы в ионосфере над Москвой / В. А. Телегин, Н. Ю. Романова, Г. А. Жбанков [и др.] // XXVII Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн» (РРВ'2021) 28 июня - 3 июля 2021, Калининград – В сб.: «Распространение радиоволн» – БФУ, Калининград : 2021. – С. 226-230.

136. Wright, J. W. Some Current Developments in Radio Systems for Sounding Ionospheric Structure and Motions. / J. W. Wright // *Proc. IEEE.* – 1969. – V.57. – P.481–486.
137. Dynasonde 21: principles of data processing, transmission and web service / N. A. Zabotin, J. W. Wright, T. W. Bullett, L. Ye. Zabolina // 11 International Ionospheric Effects Symposium, Alexandria, USA, 3-5 May 2005. – P. 7B51-7B58.
138. Paul, A. K. The interpretation of ionospheric radio drift measurements VI. Angle-of-arrival and group path [echolocation] measurements from digitized ionospheric soundings: The group-path vector / A. K. Paul, J. W. Wright, L. S. Fedor. // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1974. – Vol. 36. – P. 193-214.
139. Pitteway, M. L. V. Toward an optimum receiving array and pulse-set for the dynasonde / M. L. V. Pitteway, J. W. Wright // *Radio Science.* – 1992. – Vol. 27. – P. 481-490.
140. Zabotin, N. A. Ionospheric irregularity diagnostics from the phase structure function of MF/HF radio echoes / N. A. Zabotin, J. W. Wright // *Radio Science.* – 2001. – Vol. 36. P. 757-772.
141. Wright, J. W. High-resolution vector velocity determinations from the dynasonde / J. W. Wright, M. L. V. Pitteway // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1994. – Vol. 56. – P. 961-977.
142. Grubb, R. N. The NOAA SEL HF Radar System (Ionospheric Sounder) / R. N. Grubb // NOAA Tech. Memo. ERL SEL, 55, Space Environ. Lab., Boulder, CO, 1979.
143. Grubb, R. N. High Performance HF Radar / R. N. Grubb, R. C. Livingston, T. W. Bullett // *Proc. of the XXIX General Assembly of the URSI (Chicago, Illinois, USA, August 07-16, 2008).* – P. 130.
144. Wright, J. W. Ionogram inversion for a tilted ionosphere / J. W. Wright // *Radio Sci.* – 1990. – Vol. 25. – P. 1175–1182.
145. Wright, J. W. Data acquisition and analysis for research ionosondes, in *Computer Aided Processing of Ionograms and Ionosonde Records* / J. W. Wright, M. L. V. Pitteway // *Proceedings of Session G5 at the XXVth General Assembly of URSI (Lille, France, Aug. 28–Sept. 5, 1996).* – Report UAG 105
146. Titheridge, J. E. Modeling the peak of the ionospheric E-layer / J. E. Titheridge // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* – 2000. – Vol. 62. – P. 93-114.
147. Titheridge, J. E. Production of the low-latitude night E layer / J. E. Titheridge // *J. Geophys. Res.* – 2011. – Vol. 106. – P. 781–786.
148. Titheridge, J. E. Ionization below the night F2 layer: A global model / J. E. Titheridge // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* – 2003. – Vol. 65. – P. 1035–1052.
149. Wright, J. W. A model of the F region above hmaxF2 / J. W. Wright // *J. Geophys. Res.* – 1960. – Vol. 65. – P.185–191.

150. Wright, J. W. Comment on models of the ionosphere above hmaxF2 / J. W. Wright // J. Geophys. Res. – 1960. – Vol. 65. – P. 2595–2596.
151. Budden, K. G. The Propagation of Radio Waves / K. G. Budden – Cambridge Univ. Press, New York : 1985. – 269 p.
152. Negrea, C. Ionospheric response to tidal waves measured by dynasonde techniques / C. Negrea, N. Zabolotin, T. Bullett [et al.] // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2016. – Vol. 121. – P. 602-611. – DOI:10.1002/2015JA021574.
153. Negrea, C. Characteristics of acoustic gravity waves obtained from Dynasonde data / C. Negrea, N. Zabolotin, T. Bullett [et al.] // J. Geophys. Res.: Space Physics. – 2016. – Vol. 121. – P. 3665-3680. – DOI:10.1002/2016JA022495.
154. Negrea, C. Seasonal variability of the midlatitude traveling ionospheric disturbances from Wallops Island, VA, Dynasonde data: Evidence of a semiannual variation / C. Negrea, N. Zabolotin, T. Bullett // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2018. – Vol. 123. – P. 5047-5054. <https://doi.org/10.1029/2017JA025164>.
155. Zabolotin, N. A. Simulation of the 3D dynasonde echolocation properties in the wedge-stratified ionospheric model / N. A. Zabolotin, J. W. Wright, G. A. Zhabankov // Summary of Presentations of the RF Interactions Workshop, (18-21 April 2004, Santa Fe, New Mexico), – P. 947-953.
156. Zabolotin, N. A. New Approaches in the Problem of Electron Density Inversion from Dynasonde Measurements using Three-dimensional Echolocation Data / N. A. Zabolotin, J. W. Wright, G. A. Zhabankov // IES2005 Symposium, Alexandria, VI, 3-4 May 2005. – P. 7B51-7B58.
157. Kudeki E., Wright J. W. Estimates of the scattering cross-section of equatorial electrojet irregularities over the 3- to 7-MHz band // Radio Sci. – 1994. – V.29. – P.385-394.
158. Woodman R. F., Chau J. L., Ilma R.R. Comparison of ionosonde and incoherent scatter drift measurements at the magnetic equator // Geophys. Res. Lett. – 2006. – V.33. – L01103. doi:10.1029/2005GL023692.
159. Zabolotin, N. A. Differential vector velocity effects on HF radar soundings in the equatorial and in the polar ionosphere / N. A. Zabolotin, J. W. Wright, G. A. Zhabankov // URSI National Radio Science Meeting (3-5 January 2008, Boulder, Colorado, USA). – GS4-1. – P. 22.
160. Жбанков, Г. А. Взаимодействие электромагнитных волн коротковолнового диапазона с мелкомасштабными ионосферными неоднородностями полярной ионосферы (часть I) / Г. А. Жбанков, Н. П. Данилкин // Техника радиосвязи. – 2020. – Вып. 2 (45). – С. 18-32. – DOI: 10.33286/2075-8693-2020-45-18-32.
161. Жбанков, Г. А. Взаимодействие электромагнитных волн коротковолнового диапазона с мелкомасштабными ионосферными неоднородностями полярной ионосферы

(часть II) / Г. А. Жбанков, Н. П. Данилкин // Техника радиосвязи. – 2020. – Вып. 4 (47). – С. 45–56. – DOI: 10.33286/2075-8693-2020-47-45-56.

162. Аппаратура для исследования внешней ионосферы/ Васильев Г. В., Гончаров Л. П., Кушнеревский Ю. В. [и др.] – М.: Наука, 1980. – 303 с.

163. Особенности распространения радиоволн со спутника “Интеркосмос-19” в области гребня ночной экваториальной аномалии / Г. А. Жбанков, А. Т. Карпачев, В. А. Телегин, К. Г. Цыбуля // Геомагнетизм и аэрономия. – 2010. – Т. 50, № 1. – С. 123-130.

164. Bilitza, D. IRI the International Standard for the Ionosphere / D. Bilitza // Adv. Radio Sci. – 2018. – Vol. 16. – P. 1-11. <https://doi.org/10.5194/ars-16-1-2018>.

165. Данилкин, Задержанный нижний след на спутниковых ионограммах – новое средство изучения макронеоднородностей ионосферы / Н. П. Данилкин, Н. Г. Котонаева, М. М. Анишин // Изв. вузов. Радиофизика. – 2006. – Т. 49, № 1. – С. 9-20.

166. Карпачев, А. Т. Удаленные земные отражения на ионограммах ИСЗ “Интеркосмос-19” / А. Т. Карпачев, Г. А. Жбанков, В. А. Телегин // Геомагнетизм и аэрономия. – 2013. Т. 53, № 6. – С. 809–816. – DOI: [10.7868/S0016794013050088](https://doi.org/10.7868/S0016794013050088)

167. Об одном возможном механизме наклонного распространения радиоволн во внешней ионосфере / М. Д. Флигель // Геомагнетизм и аэрономия. – 1989. – Т. 29, № 1. – С. 71-75.

168. Карпачев, А. Т. Область постоянной генерации крупномасштабных неоднородностей в дневной зимней ионосфере южного полушария / А. Т. Карпачев, Г. А. Жбанков, В. А. Телегин // Геомагнетизм и аэрономия. – 2016. – Т. 56, № 1. – С. 69-76. – DOI: [10.7868/S0016794015060048](https://doi.org/10.7868/S0016794015060048)

169. Suvorova, A. V. TEC Enhancement due to Energetic Electrons Above Taiwan and the West Pacific / A. V. Suvorova, L.-C. Tsai, A. V. Dmitriev // Terr. Atmos. Ocean. Sci. – 2013. – V.24. – №2. – P.1-12.

170. Карпачев, А. Т. Выделение крупномасштабной неоднородности в области главного ионосферного провала по данным внешнего зондирования на ИСЗ “Интеркосмос-19” / А. Т. Карпачев, Г. А. Жбанков, В. А. Телегин // Геомагнетизм и аэрономия. – 2012. – Т. 52, № 2. – С. 219-225.

171. Карпачев, А. Т. Рассеянные отражения и множественные следы в интервале 7-10 МГц на ионограммах ИСЗ "Интеркосмос-19" / А. Т. Карпачев, Г. А. Жбанков // Геомагнетизм и аэрономия. – 2017. – Т. 57, № 4, – С. 481–489. – DOI: [10.7868/S0016794017040095](https://doi.org/10.7868/S0016794017040095)

172. Карпачев, А. Т. Диффузные структуры типа “жемчужин” на ионограммах ИСЗ “Интеркосмос_19”, связанные с неоднородностями низкоширотной ионосферы / А. Т.

Карпачев, Г. А. Жбанков, В. А Телегин // Геомагнетизм и аэрономия. – 2014. – Т. 54, № 1. – С. 65–70. – DOI: [10.7868/S0016794014010040](https://doi.org/10.7868/S0016794014010040)

173. Lockwood, G. E. K. Low latitude field aligned ionization observed by the Alouette topside sounder / G. E. K. Lockwood, L. E. Petrie // Planet. Space Sci. – 1964. – Vol. 11. – P. 327-330.

174. Guided radio-wave propagation in the equatorial ionosphere according to the topside sounding onboard Interkosmos-19 / A. T. Karpachev, G. A. Zhbankov, V. P. Kuleshova, V. A. Telegin // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2014. – Vol. 121, No. PA – P. 89-97. – DOI: [10.1016/j.jastp.2014.10.008](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.10.008)

175. Карпачев, А. Т. Волноводное распространение радиоволн в экваториальной ионосфере по данным ИСЗ “Интеркосмос-19” / А. Т. Карпачев, Г. А. Жбанков, В. А Телегин // Геомагнетизм и аэрономия. – 2014. – Т. 54, № 2. – С. 221-230. – DOI: [10.7868/S0016794014020102](https://doi.org/10.7868/S0016794014020102)

176. Muldrew, D. B. Radio propagation along magnetic field-aligned sheets of ionization observed by the Alouette topside sounder / D. B. Muldrew // J. Geophys. Res. – 1963. – Vol. 68, № 19. – P. 5355-5370.

177. Muldrew, D. B. Medium frequency conjugate echoes observed on topside-sounder data / D. B. Muldrew // Canadian J. Phys. – 1967. – Vol. 45, № 12. – P. 3935-3944.

178. Тонкие стенки неоднородностей ионизации в полярной ионосфере, обнаруживаемые методом спутникового радиозондирования / Н. П. Данилкин, С. В. Журавлев, Л. П. Морозова [и др.] // Геомагнетизм и аэрономия. – 1991. – Т. 31, № 1. – С. 137-142.

179. Latitudinal structure of the equatorial f3 layer based on INTERCOSMOS-19 topside sounding data / A. T. Karpachev, V. A. Telegin, M. V. Klimenko, G. A. Zhbankov // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2012. – Vol. 77. – P. 186–193. — DOI: [10.1016/j.jastp.2011.12.018](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.12.018)

180. Карпачев, А. Т. Неоднородная структура ионосферы по данным «Интеркосмос-19» / А. Т. Карпачев, В. А Телегин, Г. А. Жбанков // Известия высших учебных заведений, Физика. – 2015. – Т. 58, № 8/2. – С. 317-320.

181. Karpachev, A. T. Radio signal reflections in the 7-11 MHz band on the Interkosmos-19 ionograms / A. T. Karpachev, G. A. Zhbankov // 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves Gelendjik - Divnomorskoe, 26–30 июня 2017 г. – В сборнике: Conference Proceedings – 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW-2017). – Ростов-на-Дону: 2017. – P. 121-122. – DOI: [10.1109/RSEMW.2017.8103583](https://doi.org/10.1109/RSEMW.2017.8103583)

182. Karpachev, A. T. Delayed Horizontal Terrestrial Traces on the High-Latitudinal Ionograms of the Interkosmos-19 / A. T. Karpachev, G. A. Zhibankov // 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP). Kazan, July 1–6, 2019. – В сборнике : Труды XXVI Всероссийской открытой научной конференции. В 2-х томах. – Казанский (Приволжский) федеральный университет (Казань) : 2019. – Т. I. – С. 55-58. – DOI: [10.1109/RWP.2019.8810359](https://doi.org/10.1109/RWP.2019.8810359)

183. Karpachev, A. T. Investigation of the Irregular Structure of the Upper Ionosphere from the Interkosmos-19 Data / A. T. Karpachev, P. F. Denisenko, G. A. Zhibankov // 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW-2019). Divnomorskoe, 24–28 августа 2019 г. – В сборнике : 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). Conference Proceedings. – IEEE Xplore Digital Library : 2019. – P. 28-31. – DOI: [10.1109/RSEMW.2019.8792718](https://doi.org/10.1109/RSEMW.2019.8792718)

184. Демьянов, В. В. Геоestatистика: теория и практика / В. В. Демьянов, Е. А. Савельева. М.: Наука, 2010. – 327 с.

185. Байков, В. Математическая геология. Том I / В. Байков, Н. Бакиров, А. Яковлев. Ижевск: 2012. – 227 с.

186. де Мерс, М. Н. Географические информационные системы. Основы / М. Н. де Мерс. – Пер. с англ. : 999. – 288 с.

187. Данилкин, Н. П. Восстановление трёхмерного поля плотности электронов по результатам модельного эксперимента с участием бортового ионозонда и двух наземных ионозондов / Н. П. Данилкин, Г. А. Жбанков, С. В. Тасенко // Гелиогеофизические исследования. – 2013. – № 6. – С.53-63.

188. Denisenko, P. F. Correction of Models of the Ionosphere According to the Data of Network of the Ground-Based Ionosondes / P. F. Denisenko, G. A. Zhibankov, V. V. Sotsky // 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP). Kazan, July 1–6, 2019. – В сборнике : Труды XXVI Всероссийской открытой научной конференции. В 2-х томах. – Казанский (Приволжский) федеральный университет (Казань) : 2019. – Т. I. – С. 51-54. – DOI: [10.1109/RWP.2019.8810192](https://doi.org/10.1109/RWP.2019.8810192)

189. Blagoveshchensky, D. Observed and Calculated Ionograms of Oblique Ionospheric Sounding on HF Radio Paths During a Magnetic Storm of September 7–8, 2017 / D. Blagoveshchensky, G. Zhibankov, O. Maltseva // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2019. – Vol. 61, No. 12. – P. 881-892. – DOI: [10.1007/s11141-019-09944-3](https://doi.org/10.1007/s11141-019-09944-3)

190. Blagoveshchensky D. On the Role of the Ionospheric Parameters B0 and B1 in the Matching of Calculated and Experimental Values of MUF / D. Blagoveshchensky, O. Maltseva, G. Zhibankov // 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW-2019).

Divnomorskoe, 24–28 августа 2019 г. – В сборнике : 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). Conference Proceedings. – IEEE Xplore Digital Library : 2019. – P. 44-47. – DOI: [10.1109/RSEMW.2019.8792689](https://doi.org/10.1109/RSEMW.2019.8792689)

191. Трансионосферное зондирование на границе радиопрозрачности ионосферы / Н. П. Данилкин, С. И. Авдюшин, И. И. Иванов [и др.] // Геомагнетизм и аэрономия. – 1983. – Т. 23, № 4. – С. 567.

192. Двойные трансионограммы / Н. П. Данилкин, И. И. Иванов, С. В. Ковалев, Ю. В. Кушнеревский // Геомагнетизм и аэрономия. – 1986. – Т. 26, № 6. – С. 1011-1013.

193. Данилкин, Н. П. Трансионосферное радиозондирование как средство контроля состояния ионосферы / Н. П. Данилкин // В кн. «Ионосферно-магнитная служба» / Под ред. С. И. Авдюшина, А. Д. Данилова. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. – С. 79-110.

194. Природа возникновения двойных трансионограмм / Н. П. Данилкин, И. И. Иванов, Е. Б. Ипатов, В. И. Чивилев // Геомагнетизм и аэрономия. – 1996. – Т. 36, № 2. – С. 96-103.

195. Данилкин, Н. П. Обработка и интерпретация ионограмм радиозондирования ионосферы со сверхнизких орбит спутников / Н. П. Данилкин, Н. Г. Котонаева // Геомагнетизм и аэрономия. – 2009. – Т. 49, № 1. – С. 74-87.

196. Данилкин, Н. П. Радиозондирование ионосферы бортовыми и наземными ионозондами / Н. П. Данилкин. Труды Института прикладной геофизики : Москва, 2014. – вып. 91. – 308 с.

197. Reverse Satellite Transionospheric Sounding: Advantages and Prospects. Chapter in Book “Satellite Information Classification and Interpretation” / I. Ivanov, O. Maltseva, V. Sotskii, A. Tertyshnikov, G. Zhbankov. – Intech: 2019. – P. 1-19. – DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.80240>.

198. Klobuchar, J. A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users / J. A. Klobuchar // IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System. – 1987. – Vol. 23, № 3. – P. 325-331. – DOI: [10.1109/TAES.1987.310829](https://doi.org/10.1109/TAES.1987.310829)

199. Zhbankov, G. A. Influence of the ionosphere on the accuracy of the satellite navigation system / G. A. Zhbankov, N. P. Danilkin, O. A. Maltseva // Acta Astronautica. – 2022. – Vol. 190. – P.194-201. – DOI: [10.1016/j.actaastro.2021.10.004](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.10.004)

200. Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard. – U.S. Department of Defense : October, 2008. – 160 p.

201. Tinin, M. V. Influence of Ionospheric Irregularities on GNSS Remote Sensing / M. V. Tinin // Advances in Meteorology. – 2015. – Vol. 2015 – Article ID 532015. – 10 p. – <http://dx.doi.org/10.1155/2015/532015>

202. Новый подход к решению задачи повышения точности GPS-позиционирования / Н. П. Данилкин, Г. А. Жбанков, Н. Г. Котонаева, В. Б. Лапшин // Гелиогеофизические исследования. – 2019. – № 22. – С. 1-13.
203. Zhbankov, G. Accounting for small-scale irregularities in the propagation of short radio waves in the high-latitude ionosphere / G. Zhbankov, O. Maltseva // Proceedings on Engineering Sciences. – 2023. – Vol. 05, No. 1. – P. 97-104. – DOI: 10.24874/PES05.01.009
204. Gulyaeva, T. L. Towards ISO Standard Earth Ionosphere and Plasmasphere Model. In: "New Developments in the Standard Model" / T. L. Gulyaeva, D. Bilitza – NOVA Publisher, 2012. P. 1-39.
205. TEC proxy index of solar activity for the International Reference Ionosphere IRI and its extension to Plasmasphere IRI-PLAS model / T. Gulyaeva, F. Arikan, L. Poustovalova, U. Sezen // Int. J. Sci. Eng. Applied Sci. – 2017. – Vol. 3, № 5. – P. 144-150,
206. Денисенко, П. Ф. Коррекция высотных профилей электронной концентрации по данным вертикального зондирования с использованием модели IRI / П. Ф. Денисенко, В. В. Соцкий // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. – Т. 59, № 6. – С. 774-785.
207. Мониторинг ионосферы в Арктике на основе спутниковых ионозондов / Н. П. Данилкин, Г. А. Жбанков, С. В. Журавлев, Н. Г. [и др.] // Гелиогеофизические исследования. – 2016. – № 14. – С. 31-45.
208. Радиозондирование высокоширотной ионосферы с гидрометеорологического комплекса «Арктика-М» / Н. П. Данилкин, С. В. Журавлёв, Н. Г. Котонаева [и др.] // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. – 2017. – № 3/37. – С. 103-109.
209. Определение критической частоты слоя ионосферы F2 над Арктикой по данным транзионограмм, полученным с высокоапогейных спутников / Н. П. Данилкин, Г. А. Жбанков, В. Б. Лапшин [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. – 2017. – № 5 (98). – С. 140-149.
210. Возможность непрерывного наблюдения со спутников «Арктика-М» тонких стенок повышенной плотности плазмы в высокоширотной ионосфере / Н. П. Данилкин, Г. А. Жбанков, В. Б. Лапшин, М. Ю. Филиппов // Вестник «НПО им. С.А. Лавочкина». – 2017. – № 4/38. – С. 53-59.
211. Данилкин, Н. П. Радиозондирование ионосферы бортовыми и наземными ионозондами / Н. П. Данилкин. Труды Института прикладной геофизики : Москва, 2014. – вып. 91. 212 с.
212. Reverse Satellite Transionospheric Sounding: Advantages and Prospects. Chapter in Book “Satellite Information Classification and Interpretation” / I. Ivanov, O. Maltseva, V. Sotskii,

A. Tertyshnikov, G. Zhbakov. – Intech: 2019. – P. 1-19. – DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.80240>.

213. Возможность радиозондирования ионосферы в декаметровом диапазоне с борта геостационарного ИСЗ / Г. В. Гивишвили, Н. П. Данилкин, Г. А. Жбанков, И. В. Крашенинников // Геомагнетизм и аэрономия. – 2012. – Т. 52, № 4. – С. 1-6.

214. Трансионосферное радиозондирование с учетом отражения радиоволн от Земли / Н. П. Данилкин, Г. А. Жбанков, С. В. Журавлев, Н. Г. Котонаева // Геомагнетизм и аэрономия. – 2014. – Т. 54, № 4. – С. 508–519. – DOI: [10.7868/S0016794014040130](https://doi.org/10.7868/S0016794014040130)

215. Радиозондирование ионосферы ионозондами, установленными на борту международной космической станции и транспортного грузового корабля «Прогресс» / Н. П. Данилкин, Г. А. Жбанков, С. В. Журавлёв [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. – 2015. – № 6 (85). – С. 121-127.

216. Радиозондирование высокоширотной ионосферы с гидрометеорологического комплекса «Арктика-М» / Н. П. Данилкин, С. В. Журавлёв, Н. Г. Котонаева [и др.] // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. – 2017. – № 3/37. – С. 103-109.

217. Определение критической частоты слоя ионосферы F2 над Арктикой по данным транзионограмм, полученным с высокоапогейных спутников / Н. П. Данилкин, Г. А. Жбанков, В. Б. Лапшин [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. – 2017. – № 5 (98). – С. 140-149.

218. Некоторые особенности построения транзионограмм, получаемых с борта высокоапогейных спутников / Н. П. Данилкин, Г. А. Жбанков, А. Ю. Репин [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. – 2018. – № 3(102). – С. 46-52.

219. On Continuous Observations of Thin Walls of High-Density Plasma in the High-Latitude Ionosphere from Arktika-M Satellites / N. P. Danilkin, G. A. Zhbakov, V. B. Lapshin, M. Y. Filippov // Solar System Research. – 2018. – Vol.52, No. 7. – P. 699–705. – DOI: [10.1134/S0038094618070055](https://doi.org/10.1134/S0038094618070055)

220. Radiosounding of the High-Latitude Ionosphere with the Arktika-M Hydrometeorological Complex / N. P. Danilkin, S. V. Zhuravlev, N. G. Kotonaeva [et al.] // Solar System Research. – 2018. – Vol. 52, № 7. – P. 684–690. – DOI: [10.1134/S0038094618070043](https://doi.org/10.1134/S0038094618070043)

221. Satellite radiosounding of the polar ionosphere: results of the experiments of the XX century and hopes of the XXI century / G. A. Zhbakov, V. B. Lapshin, N. P. Danilkin [et al.] // 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves Gelendjik - Divnomorskoe, 26–30 июня 2017 г. – В сборнике: Conference Proceedings – 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW-2017). – Ростов-на-Дону: 2017. – P. 28-30. – DOI: [10.1109/RSEMW.2017.8103553](https://doi.org/10.1109/RSEMW.2017.8103553)

222. Measurements of foF2 in the Arctic Based on Space and Ground-Based Ionosondes / N. P. Danilkin, G. A. Zhbakov, A. Y. Repin [et al.] // 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW-2019). Divnomorskoe, 24–28 августа 2019 г. – В сборнике: 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). Conference Proceedings. – IEEE Xplore Digital Library : 2019. – P. 56-59. – DOI: [10.1109/RSEMW.2019.8792723](https://doi.org/10.1109/RSEMW.2019.8792723)
223. Bilitza, D. The International Reference Ionosphere – Climatological Standard for the Ionosphere. In Characterising the Ionosphere / D. Bilitza // Meeting Proceedings RTO-MP-IST-056, Paper 32. – Neuilly-sur-Seine, France: RTO. – 2006. – P.32-1–32-12.
224. Improvements of the International Reference Ionosphere model for the topside electron density profile / D. Bilitza, B. W. Reinisch, S. M. Radicella [et al.] // Radio Sci. – 2006. – Vol. 41. – RS5S15. – DOI:10.1029/2005RS003370.
225. Bilitza, D. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and New Parameters / D. Bilitza, B. W. Reinisch. // Adv. Space Res. – 2008. – V. 42. – P. 599-609.
226. Bilitza, D. A correction for the IRI topside electron density model based on Alouette/ISIS topside sounder data / D. Bilitza // Adv. Space Res. – 2004. – Vol. 33, № 6. – P. 838-843.
227. Radicella, S. M. The evolution of the DGR approach to model electron density profiles / S. M. Radicella, R. Leitinger // Adv. Space Res. – 2001. – Vol. 27. – P. 35-40.
228. Topside electron density in IRI and NeQuick: Features and limitations / P. Coïsson, S. M. Radicella, R. Leitinger, B. Nava // Adv. Space Res. – 2006. – Vol. 37, № 5. – P. 937–942.
229. Maltseva, O. A. Comparison of the improved TEC model based on IRI with experimental data / O. A. Maltseva, G. A. Zhbakov, Q. T. Trinh // Ionospheric Radio Systems and Techniques (IRTS2009), 28-30 April 2009, Edinburgh, UK : сборник докладов: IET Conference Publications. IET 11th International Conference on Ionospheric Radio Systems and Techniques, IRST 2009. – Edinburgh: 2009. – P. 245-249. – DOI: [10.1049/cp.2009.0072](https://doi.org/10.1049/cp.2009.0072)
230. Mendillo, M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content / M. Mendillo // Rev. Geophys. – 2006. – Vol. 44. – RG4001. – P. 1-47.
231. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998 / M. Hernandez-Pajares, J. M. Juan, R. Orus [et al.] // J. Geod. – 2009. – Vol. 83. – P. 263-275.
232. Ciralo, L. Evaluation of GPS L2-L1 biases and related daily TEC profiles / Ciralo, L. – In: Proc. GPS/Ionosphere Workshop, Neustrelitz. – 1993. – P. 90-97.
233. Solar and latitude dependence of TEC and SLAB thickness / S. S. Kouris, K. V. Polimeris, L. R. Cander, L. Ciralo // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2008. – Vol.70. – P. 1351-1365.

234. Bilitza, D. Evaluation of the IRI-2007 model options for the topside electron density / D. Bilitza // *Advances in Space Research.* – 2009. – Vol. 44, № 6. – P. 701-706. – <https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.04.036>.
235. Мальцева, О. А. Особенности поведения полного электронного содержания и их отражение в модели ионосферы / О. А. Мальцева, Г. А. Жбанков, К. Т. Чинь // *Излучение и рассеяние электромагнитных волн. ИРЭМВ-2009*». Труды Международной научной конференции. Таганрог-Дивноморское, Россия, 27 июня - 1 июля 2009 г. : сборник докладов – Технологический институт Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Южный федеральный университет" в г. Таганроге: 2009. – С. 533-537.
236. Araujo-Pradere, E. A. STORM: An empirical storm-time ionospheric correction model, 1, Model description / E. A. Araujo-Pradere, T. J. Fuller-Rowell, M. V. Codrescu. // *Radio Sci.* – 2002. – Vol. 37, № 5. – P. 1070-1081. – DOI:10.1029/2001RS002467.
237. Maltseva, O. A. Improvement of the real time total electron content based on the International Reference Ionosphere model / O. A. Maltseva, G. A. Zhibankov, T. Trinh Quang // *Advances in Space Research.* – 2010. – Vol.46, No 8. – P. 1008-1015. – DOI: [10.1016/j.asr.2010.06.011](https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.06.011)
238. GIM-TEC adaptive ionospheric weather assessment and forecast system / T. L. Gulyaeva, F. Arikan, M. Hernandez-Pajares, I. Stanislawski // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* – 2013. – Vol. 102. – P. 329–340.
239. Gulyaeva, T. L. International standard model of the Earth's ionosphere and plasmasphere / T. L. Gulyaeva // *Astronomical and Astrophysical Transactions.* – 2003. – Vol. 22, – № 4-5. – P. 639-643.
240. Fridman, S. V. Personal-computer-based system for real-time reconstruction of the three-dimensional ionosphere using data from diverse sources / S. V. Fridman, L. J. Nickisch, M. Hausman // *Radio Sci.* – 2009. – Vol. 44. – RS3008. – 12 p.
241. Мальцева, О. А. Сравнение корректирующих множителей модели ионосферы IRI2007 с экспериментальными данными / О. А. Мальцева, Г. А. Жбанков, Т. В. Никитенко // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 2011. – Т. 51, № 3. – С. 1-10.
242. Использование современных технологий и данных при изучении распространения радиоволн в ионосфере, / Г. А. Жбанков, О. А. Мальцева, Н. С. Можаяева, Т. В. Никитенко // XXIII всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн», Йошкар-Ола, 23-26 мая 2011 г. : сборник докладов – Йошкар-Ола : 2009. – Т. 2. – С. 231-234.
243. Погрешности прогнозирования ионосферного прохождения радиоволн на основе глобальной ионосферной модели / И. В. Крашенинников, И. Б. Егоров, О. П.

Коломийцев, Ю. Н. Черкашин // Геомагнетизм и аэрономия. – 2004. – Т. 44, № 2. – С. 221-226.

244. Maltseva, O. Comparison of various methods to control conditions of radio wave propagation in the ionosphere / O. Maltseva, N. Moshaeva, G. Zhbankov // 30th URSI General assembly and scientific symposium, URSIGASS 2011. Istanbul, 13–20 августа 2011 г. : В сборнике: 2011 30th URSI General Assembly and Scientific Symposium, URSIGASS 2011. – GP2.1. – P. 6051001. – DOI:[10.1109/URSIGASS.2011.6051001](https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2011.6051001)

245. Use a TEC global maps and the IRI model to study ionospheric response to geomagnetic disturbances. / O. A. Maltseva, N. S. Mozhaeva, O. S. Poltavsky, G. A. Zhbankov // Advances in Space Research. – 2012. – Vol. 49, No. 6. – P. 1076-1087.

246. Arikan, F. Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data / F. Arikan, C. B. Erol, O. Arikan // J. Geophys. Res. – 2003. – Vol. 108. – A12. – P. 1469-1480. – DOI:10.1029/2002JA009605

247. Maltseva, O. A. A new model of the International Reference Ionosphere IRI for Telecommunication and Navigation System / O. A. Maltseva, N. S. Mozhaeva, G. A. Zhbankov // Proceedings of the First International Conference on Telecommunications and Remote Sensing, Sofia, Bulgaria, 29-30 August 2012. – P.129-138.

248. Gulyaeva, T. L. International standard model of the Earth's ionosphere and plasmasphere / T. L. Gulyaeva // Astronomical and Astrophysical Transaction. – 2003. – No. 22(4). – P. 639-643.

249. Klobuchar, J. A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users / J. A. Klobuchar // IEEE Transactions on aerospace and electronic systems. – 1987. – AES-23(3). – P. 325-331.

250. Empirical models of total electron content based on functional fitting over Taiwan during geomagnetic quiet condition / Y. Kakinami, C. H. Chen, J. Y. Liu [et al.] // Ann. Geophys. – 2009. – Vol. 27. – P. 3321-3333.

251. Hoque, M. M. A new global empirical NmF2 model for operational use in radio systems / M. M. Hoque, N. Jakowski // Radio Sci. – 2011. – Vol. 46. – RS6015. – 13 p.

252. Global TEC maps based on GNSS data: 1. Empirical background TEC model / P. Mukhtarov, D. Pancheva, B. Andronov, L. Pashova // J. Geophys. Res.: Space Physics. – 2013. – Vol. 118. – P. 4594–4608. – DOI:10.1002/jgra.50413.

253. Мальцева, О. А. Тестирование модели NGM по данным российских ионосферных станций / О. А. Мальцева, Н. С. Можаяева // Международная научная конференция «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ-2013, Таганрог-Дивноморское, Россия, 24 - 28 июня 2013 г. : сборник докладов – Технологический институт

Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Южный федеральный университет" в г. Таганроге : 2013. – С.607-611.

254. Houminer, Z. Improved short –term predictions of foF2 using GPS time delay measurements / Z. Houminer, H. Soicher // Radio Sci. – 1996. – V.31. – №5. – P.1099-1108.

255. Investigation of Ionospheric Slab Thickness and Plasmaspheric TEC Using Satellite Measurements / P. Vryonides, C. Tomouzos, G. Pelopida, H. Haralambous // Progress In Electromagnetics Research Symposium. – In « PIERs Proceedings, Moscow, Russia, August 19-23, Moscow» Moscow, Russia : 2012. – Vol. 2. – P. 1172-1175.

256. Kouris, S. S. Specifications of TEC variability / S. S. Kouris, K. V. Polimeris, Lj. R. Cander // Adv. Space Res. – 2006. – Vol. 37. – P. 983-1004.

257. Stankov, S. M. Ionospheric slab thickness – Analysis, modeling and monitoring / S. M. Stankov, R. Warnant // Adv. Space Res. – 2009. – Vol. 44. – P. 1295-1303.

258. The ionospheric storms in the American sector and their longitudinal dependence at the northern middle latitudes / W. Liu, L. Xu, C. Xiong, J. Xu // Advances in Space Research. – 2017. – Vol. 59. – P. 603–613.

259. Validation of CAS’s final global ionospheric maps during different geomagnetic activities from 2015 to 2017 / A. Liu, N. Wang, Z. Li, K. Zhou, H. Yuan // Results in Physics. – 2018. – Vol. 10. – P. 481–486.

260. Panda, S. K. Ionospheric TEC Variations at low Latitude Indian Region / S. K. Panda, S. S. Gedam, S. Jin // Chapter 8 from the book «Satellite Positioning - Methods, Models and Applications» : IntechOpen, 2015. – P. 149-174.

261. A new regional total electron content empirical model in northeast China / J. Feng, Z. Wang, W. Jiang, Z. Zhao, B. Zhang // Advances in Space Research. – 2016. – V.58. – P.1155–1167.

262. Comparison of regional and global TEC values: Turkey model / F. Basciftci, C. Inal, Ö. Yildirim, S. Bulbul // International Journal of Engineering and Geosciences (IJEG). – 2018. – Vol. 3, No. 2. – P. 061-072. – DOI:[10.26833/ijeg.382604](https://doi.org/10.26833/ijeg.382604)

263. Najman, P. Performance Analysis of Empirical Ionosphere Models by Comparison with CODE Vertical TEC Maps / P. Najman, T. Kos. // Chapter 13 in book “Mitigation of Ionospheric Threats to GNSS: an Appraisal of the Scientific and Technological Outputs of the TRANSMIT Project” : IntechOpen, 2014. – P. 162-178.

264. Farah, A. M. A. Comparison of GPS/GALILEO single frequency ionospheric models with vertical TEC maps / A. M. A. Farah // Artificial Satellites. – 2008. –Vol. 43, № 2. – P. 75-90.

265. Comparison of GPS Positioning Accuracy Using Klobuchar Model and IGS TEC Model in Thailand / S. Jongsintawee, S. Rungraengwajjake, P. Supnithi, C. Panachart // KMITL Sci. Tech. J. – 2016. – Vol. 6, № 1. – P. 1-10.
266. Accuracy evaluation of estimated ionospheric delay of GPS signals based on Klobuchar and IRI-2007 models in low latitude region / K. C. T. Swamy, A. D. Sarma, V. S. Srinivas [et al.] // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013. – Vol. 10, № 6. – P. 1557-1561.
267. Ratnam, D. V. Improvement of Indian-Regional Klobuchar Ionospheric Model Parameters for Single-Frequency GNSS Users / D. V. Ratnam, J. R. K. Kumar Dabbakuti, N. V. V. N. J. Sri Lakshmi // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2018. – Vol. 15, № 7. – P. 971-975.
268. Determination of nighttime VTEC average in the Klobuchar ionospheric delay model / W. Zhou, S. Song, Q. Chen, N. Cheng, H. Xie // Geodesy and Geodynamics. – 2018. – Vol. 9. – P. 175-182.
269. Alcay, S. Analysis of global TEC prediction performance of IRI-PLAS model / S. Alcay, G. Oztan // Advances in Space Research. – 2019. – Vol. 63. – P. 3200-3212.
270. Assessment of the NeQuick-2 and IRI-Plas 2017 models using global and long-term GNSS measurements / D. Okoh, S. Onwuneme, G. Seemala [et al.] // J.Atmos. Solar.-Terr. Phys. – 2018. – Vol. 170. – P. 1-10.
271. Maltseva? O. A. Possibilities of the usage of the total electron content in a low-latitude zone / O. A. Maltseva, N. S. Mozhaeva // Advances in Space Research. – 2019. – P. 2114-2124. – <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.07.010>.
272. NeQuick 2 and IRI Plas VTEC predictions for low latitude and South American sector / R. G. Ezquer, L. A. Scida, Y. Migoya Orue [et al.] // Advances in Space Research. – 2018. – Vol. 61. – P. 1803-1818.
273. Atıcı, R. Comparison of GPS TEC with modelled values from IRI 2016 and IRI-PLAS over Istanbul, Turkey / R. Atıcı // Astrophys. Space Sci. – 2018. – Vol. 363 – A.n.231. – DOI : <https://doi.org/10.1007/s10509-018-3457-0>
274. Empirical forecast of quiet time ionospheric Total Electron Content maps over Europe / R. Badeke, C. Borries, M. M. Hoque, D. D. Minkwitz // Advances in Space Research. – 2018. – Vol. 61. – P. 2881-2890.
275. Mukhtarov, P. Empirical model of TEC response to geomagnetic and solar forcing over Balkan Peninsula / P. Mukhtarov, B. Andronov, D. Pancheva // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2018. – Vol. 167. – P. 80-95. – DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.11.010>

276. Regional modeling of ionospheric peak parameters using GNSS data—An update for IRI / W. Liang, M. Limberger, M. Schmidt [et al.] // *Advances in Space Research.* – 2015. – Vol. 55 – P. 1981-1993.
277. Habarulema, J. B. Adapting a climatology model to improve estimation of ionosphere parameters and subsequent validation with radio occultation and ionosonde data / J. B. Habarulema, N. Ssessanga // *Space Weather.* – 2017. – Vol. 15. – P. 84-98.
278. Evaluation of a global model of ionospheric slab thickness for foF2 estimation during geomagnetic storm / B. Muslim, H. Haralambous, C. Oikonomou, S. Anggarani // *Annals of Geophysics.* – 2015. – Vol. 58, № 5. – A0551.
279. Performance evaluation of GIM-TEC assimilation of the IRI-Plas model at two equatorial stations in the American sector / S. J. Adebisi, B. O. Adebisi, S. O. Ikubanni, B. W. Joshua // *Space Weather.* – 2017. – Vol. 15. – P. 726-736.
280. Determination of the ionospheric foF2 using a stand-alone GPS receiver / D. D. Wijaya, H. Haralambous, C. Oikonomou, W. Kuntjoro // *J Geod.* – 2017. – Vol. 91. – P. 1117-1133.
281. Alizadeh, M. M. Ray tracing technique for global 3-D modeling of ionospheric electron density using GNSS measurements / M. M. Alizadeh, H. Schuh, M. Schmidt // *Radio Sci.* – 2015. – Vol. 50. – P. 539-553.
282. A topside ionosphere-plasmasphere model for operational applications / N. Jakowski, I. S. Kutiev, S. Heise, A. Wehrenpfennig // *URSI XXVII General Assembly, Maastricht, Netherlands, 2002* : in «*Proceeding of URSI XXVII General Assembly*» : Maastricht, Netherlands», 2002. – P. 2174-2177.
283. On the development of a method for updating an empirical climatological ionospheric model by means of assimilated vTEC measurements from a GNSS receiver network / A. Pignalberi, J. B. Habarulema, M. Pezzopane, R. Rizzi // *Space Weather.* – 2019. – Vol. 17. – P. 1131-1164.
284. Shubin, V.N. Global model of the F2 layer peak height for low solar activity based on GPS radio-occultation data / V. N. Shubin, A. T. Karpachev, K. G. Tsybulya // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* – 2015. – Vol. 104. – P. 106-115.
285. Effective solar indices for ionospheric modeling: A review and a proposal for a real-time regional IRI / A. Pignalberi, M. Pezzopane, R. Rizzi, I. Galkin // *Surveys in Geophysics.* – 2018. – Vol. 39, № 1. – P. 125-167.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Особенности программно-аппаратного комплекса Диназонд-21

Диназонд-21, «ионозонд 21 века» – современный программно-аппаратный комплекс для диагностики ионосферы, предназначенный как для задач исследования, так и для задач наблюдения. На аппаратном уровне он представляет собой СЧ/ВЧ радар (0.1 - 25 МГц), все функции которого – частоты и форма передаваемого сигнала, диапазон приёмника и определение принимаемых параметров – заданы программно. Восемь цифровых приёмников обеспечивают качественную фазочувствительную детекцию компонент комплексной амплитуды сигнала I и Q, внутреннюю балансировку приёмника в отсутствие сигнала. Увеличение точности параметров идёт за счёт нового решения импульсной установки и антенны. Эти особенности, вместе с высоким отношением сигнал/шум (30 - 50 дБ), типичным для ионозондов, удовлетворяют требованиям программного комплекса DSND Диназонда 21. Посредством удобного пользовательского интерфейса может быть разработана любая реалистичная частотно-временная модель зондирования. Поставляемая вместе с комплексом модель зондирования и анализа результатов показала своё удобство для задач наблюдения и исследования ионосферы. С помощью стандартных утилит она может быть легко трансформирована для других целей.

Диназонд-21 с самого начала позиционировался как полностью автоматизированный исследовательский комплекс. Все этапы работы, начиная от определения времени сеанса и заканчивая выводом результатов, выполняются в автоматическом режиме под управлением программного модуля без участия оператора.

Благодаря современному программному обеспечению, комплекс имеет возможность автоматической интеграции в среду Интернет. Как следствие этого, новая система предлагает современное решение вопросов местного или удаленного администрирования, хранения внутренних результатов анализа, централизованного хранения данных и передачи их удаленным пользователям, обладает удобными интерактивными методами просмотра и визуализации данных.

Все это позволяет утверждать, что, хотя Диназонд-21 и является автономной станцией ионосферных исследований, но наиболее полно его возможности можно использовать при объединении нескольких станций в единую сеть, управляемую централизованно.

Основные принципы идеологии «Диназонда-21»

Известно, что эффект полного внутреннего отражения радиоволн КВ диапазона очень чувствителен к структурным и временным свойствам ионосферы. Основные результаты можно получить, даже располагая скромными аппаратными и программными ресурсами (это объясняет успех наблюдений с использованием простых аналоговых ионозондов); это также объясняет, как некоторые относительно сложные системы, основанные на эксцентричных идеологиях, получают полезные данные. Но гораздо большего можно достигнуть, основываясь на том, что каждое легко распознаваемое ионосферное «эхо» (отражение) – составной объект со своими индивидуальными свойствами, содержащими пять значений (частотные, временные и пространственные). При соответствующей обработке измерения их совокупности, отображаемые на экране, могут использоваться для описания ионосферного состояния в мельчайших подробностях, что невозможно сделать, пользуясь любыми другими средствами. Имеет смысл исследовать, как лучше всего это сделать. Ниже представлены основные идеологические принципы диназонда:

1. Самое важное свойство ионосферного радиоэха – его фаза. Это не относится непосредственно к мгновенной фазе колебания радиочастоты, которая приводится в приемнике при помощи операции свертки к «полосе немодулированных частот»; это относится к остающейся фазе задержки, накопленной исключительно распространением и процессами отражения (вместе с некоторыми аппаратными погрешностями, которые учитываются в процессе калибровки). В современной технологии эта фазовая информация сохраняется путем быстрого определения синфазных квадратурных компонент по времени запаздывания в течение соответствующего окна приема после посылки импульса. Для большей определенности квадратурные компоненты сигнала I и Q (реальная и мнимая часть комплексной амплитуды), представленные в цифровой форме с 16-битовым разрешением, начинают определяться с задержкой не более, чем 300 μ s (45 км «действующей высоты») относительно излученного импульса, и в течение одной выборки каждые 10 μ s, продолжаясь до задержки не менее 6000 μ s (900 км). Они должны адекватно определять все зондируемые диназондом объекты. При расширении задач возможны более высокая частота дискретизации и увеличение максимальной задержки. Важность фазы отраженного сигнала требует, чтобы аппаратура обладала высокой стабильностью частоты и фазы и подходящей схемой калибровки, чтобы удалить (в процессе обработки данных) все связанные с ней сдвиги фазы между различными каналами.
2. Диназонд не жертвует временным разрешением из-за отсутствия необходимости

сложения сигналов.

3. Диназонд различает временную и частотную зависимости, а также поддерживает «ортогональность» между ними. Это позволяет определять ошибки, связанные с частотой и временем, независимо друг от друга.
4. Практически передающие антенны засвечивают “целое небо”. Так как ионосферная поверхность отражения является сильно изменчивой, то отражения, отображаемые на экране, приходят от различных участков. Чем более возмущена отражающая поверхность, тем больше отражений присутствует на экране. Dynasonde должен справиться с этой ситуацией посредством конфигурации приемных антенн и последующего анализ данных.
5. Диназонд имеет столько же параллельных приемников, сколько и приемных антенн (по 8). Это означает, что частотно-временные и пространственные группы переменных разрешаются полностью независимо. Это остается таковым, даже если используется уменьшенный массив 4 антенн и приемников.
6. X, Y опорные линии антенной решетки обязаны быть ортогональными, чтобы поддерживать независимость оценок ошибки в этих пространственных направлениях. С 8 каналами приема эта независимость может быть поддержана до второго порядка, позволяя производить оценку пространственных искривлений фронта импульса.
7. Использование больше двух антенн в опорной линии преследует также другую дополнительную и очень важную цель: ионосфера должна быть прозондирована в широком радиодиапазоне длин волн. Оценки эхолокации зависят от различий фазы между отдельными антеннами, но такие различия могут только быть известны в диапазоне $\pm 180^\circ$. С единственной парой антенн в опорной линии может возникнуть неопределенность полного циклического сдвига, если длина волны меньше чем разрешение антенн. При наличии более, чем двух антенн в опорной линии, их взаимное расположение может использоваться, чтобы уменьшить потенциальный риск совмещения отражений. С другой стороны, если длина волны сильно превышает разрешение антенны, отражения определены недостаточно точно и наличие дополнительных антенн позволяет увеличить точность измерений.
8. Так как кодирование излучаемого импульса и его когерентное сложение в процессе работы диназонда не используются, то единственные свойства излучаемого импульса, представляющие интерес в данном приложении, – его стабильность частоты, форма пакета и пиковая мощность. Обычные

высококачественные стандарты частоты/времени и синтеза частот, применяемые в современной аппаратуре, вполне удовлетворяют накладываемым требованиям. Известно, что результаты зондирования не зависят критически от формы огибающей импульса, но эта возможность должна быть учтена при использовании диназона для возможной работы для других целей. Кроме того, в полосе частот зондирования могут присутствовать нескольких определенных узких полос, используемых другими потребителями. Это также необходимо учитывать при выборе формы излучаемого пакета радиоволн.

Требования, предъявляемые к аппаратуре

Можно указать следующие стандартные требования, предъявляемые к аппаратуре, используемой комплексом диназона. Одновременно приводятся краткие пояснения данного выбора.

Радиочастоты

Минимальная частота – 1.0 МГц. Некоторые приложения связаны с наблюдениями ночной Е-области ионосферы. Это потребует снижения данного параметра приблизительно до 0.5 МГц.

Максимальная частота – 30 МГц. Дополнительные приложения системы (наклонное зондирование, метеорные и исследования рассеяния) могут потребовать расширения диапазона до 50 МГц.

Разрешающая способность по частоте – 100 Гц. Этому требованию с запасом удовлетворяют современные цифровые устройства. Разрешающая способность не используется в анализе данных. Точная используемая частота должна быть указана в выходном файле данных.

Масштаб частоты. Необходимым и достаточным является возможность полного компьютерного управления частотой. Изменения частоты должны происходить в пределах 0.001 сек или меньше.

Стабильность частоты. Обычные высокие современные стандарты.

Характеристики излучаемого импульса

Частота излучения – 100 Гц. Более низкая частота послышки импульсов приведет к дополнительным временным затратам, более высокая – ограничит диапазон наблюдений отражений и может привести к наложению кратных отражений предыдущего импульса на последующий.

Форма импульса: «гауссовский», «cos», «cos²». Эти формы имеют подобные спектры и уменьшают распыление спектра излучаемого сигнала.

Длительность импульса – 60µs. Более короткая длительность импульса требует широкой пропускной способности приемника, что приводит к увеличению шумов. Это также усиливает дисперсионные искажения в процессе ионосферного отражения. Длительные импульсы увеличивают режим работы передатчика и уменьшают разрешающую способность диапазона измерения.

Пиковая мощность – 0.3 – 4 kW. Оптимальное значение необходимо выбирать, исходя из конкретных условий и комплекта аппаратуры.

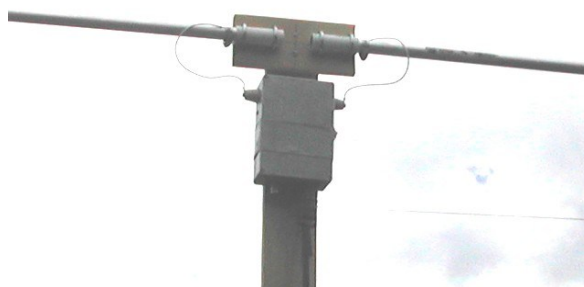
Излучающие антенны

Система не накладывает специфических требований на передающие антенны. Она может работать с различными антеннами данного класса. Можно привести различные типы антенн, используемые диназондом:

- Скрещенные вертикальные дельты в Bear Lake;
- антенна LPA (лог-периодическая) Wallops Islands;
- двойной ромб в Томске;
- переменный волновой диполь на ст. Siple;
- двойная трапеция в Тромсе.

Приемные антенны

Хорошие результаты были получены в EISCAT с широкополосными диполями (две алюминиевые трубки диаметром 15 см и длиной 11м, 2м над землей), связанными через 1200Ω/50Ω трансформаторы с широкополосными усилителями по 10 децибелов. В новую модификацию Dynasonde-21 включен специальный широкополосный активный усилитель вместе с короткими диполями (рисунок П1.1). Длина половины вибратора, как показывает опыт ионосферной станции в Томске, должна быть 3 - 3,5 м, чтобы исключить влияние метровых каналов телевидения.



(a)



(б)

Рисунок П1.1 - Внешний вид приемной антенны в Boulder (a) и Томске (б)

В качестве альтернативы можно использовать компактные магнитные рамки с соответствующими предусилителями.

Антенная решетка должна включать в себя 8 антенн, расположенных вдоль двух перпендикулярных опорных линий. Земельный участок, занимаемый решеткой должен быть горизонтальным и плоским. Ориентация опорных линий в среднеширотном регионе не имеет принципиального значения. Однако важно, чтобы все антенны одной опорной линии были ориентированы одинаково. Геометрические размеры антенного поля также не являются жестко заданными. Расстояние между крайними антеннами должны быть в диапазоне от 80 до 120 м. Для этапа калибровки необходимо лишь тщательно определить все расстояния.

Схематично это выглядит следующим образом (рисунок П1.2):

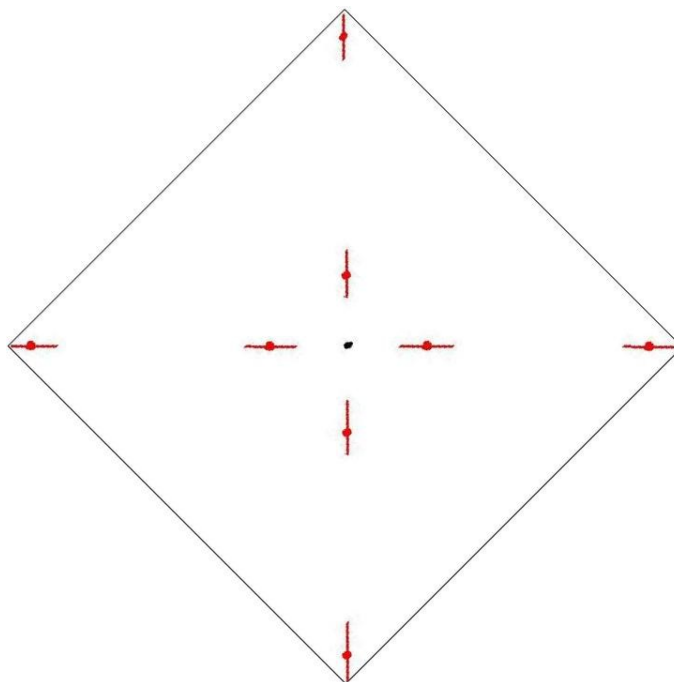


Рисунок П1.2 - Схема антенной решетки Диназонда-21

Ниже на рисунке П1.3 приведена фотография существующего антенного поля ст. Boulder (крестиками помечены приемные антенны диназонда).



Рисунок П1.3 - Антенное поле ст. Boulder (крестиками помечены приемные антенны диназонда)

В Томске решетка представляет собой два квадрата, в углах которых располагаются антенны, т.е. на линиях их диагоналей. Большой квадрат имеет сторону 80 м, а малый – $1/6$ от большого (13,33 м).

Алгоритм работы и представление результатов

Ниже излагаются методы, используемые при обработке полученных программным комплексом «Диназонд-21» сигналов, а также описывается форма представления полученных результатов.

Первичная обработка данных

Пакеты импульсов и распознавание эхо

В большинстве режимов работы диназонд получает данные в широком диапазоне радиочастот «пакетами импульсов», каждый из которых состоит из нескольких импульсов (от 4 до 8) с заданными задержками по времени и смещениями радиочастоты df . Оцифровка комплексной амплитуды на приемнике производится с 10 μ s интервалами по всему диапазону задержки эхо. Выборки, обработанные методами распознавания отражения и шума, приводятся к довольно компактной форме регистрации первичных комплексных значений амплитуды для каждого эха, импульса, антенны и df . Диназонд имеет два приемника, так что, например, 8 импульсов обеспечивают 32 вещественных значения амплитуды.

Строго говоря, параметры зондирующего сигнала могут быть довольно разнообразными. Для конкретной ионограммы, полученной в Томске и приведенной ниже, было использовано 372 базовых частоты, распределенных по логарифмическому закону между 1600 КГц и 10000 КГц, и наборы из 8 импульсов, каждый из которых имел следующее смещение по частоте относительно базовой: 1,-3,+3,-1,-1,+3,-3,1 КГц. Промежуток между двумя импульсами был равен 10 мсек, длительность каждого импульса была равна 60 мкс.

Распознавание эха компьютером диназонда происходит в режиме реального времени (времени пакета 0.08 сек) процедурой "PEAKS": 5- или 7-точечным сглаживающим алгоритмом (для минимизации шумовых помех) определяются пики амплитуды в пределах каждой записи. Затем проводится сравнение на соответствие между всеми импульсами пакета. В случае совпадения в допустимых пределах пик регистрируется как подлинное отражение и отображается на экране. Однако данный процесс в некоторых случаях отбрасывает реально существующие отражения; в частности это случается, когда пересекаются несколько отражений и их относительные фазы тоже близки, вследствие чего модуль амплитуды может походить на широкое плато, где сложно выбрать максимум.

Визуально результат работы процедуры распознавания эхо на одном канале выглядит следующим образом (рисунок П1.4). Его можно получить, используя дополнительные возможности пакета «Диназонд-21» (файл типа «*.png»).

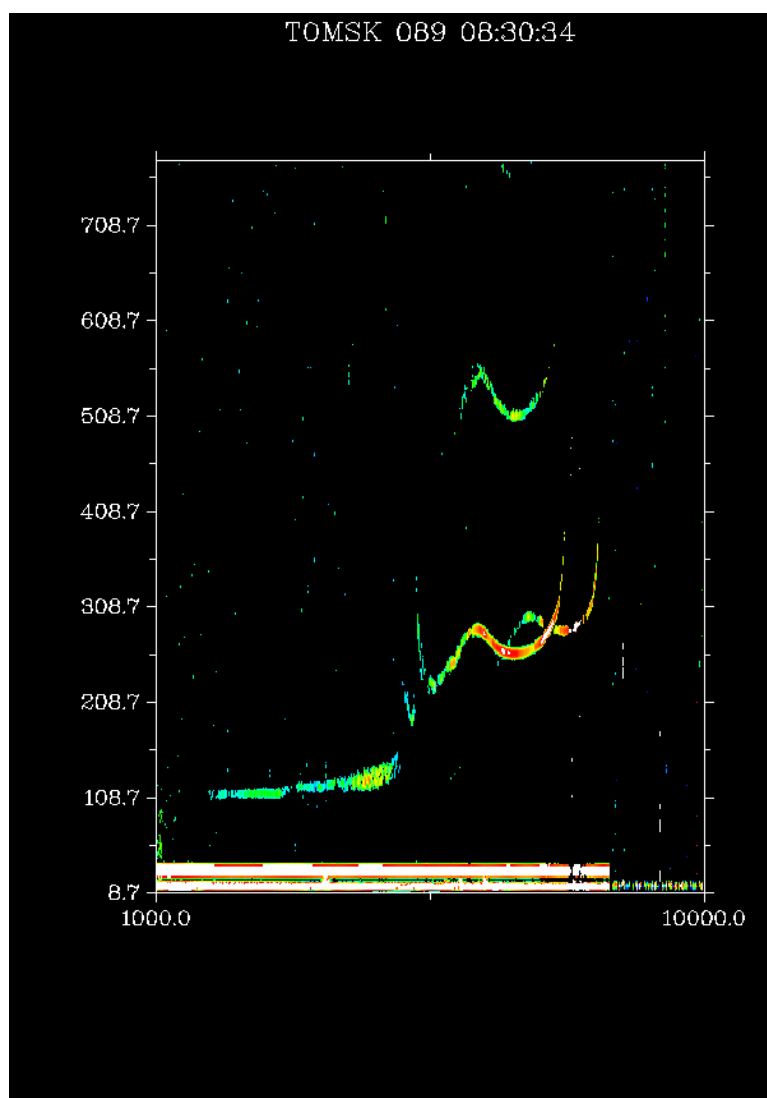


Рисунок П1.4 - Результат работы процедуры распознавания эхо на одном канале Диназонда-21

Информация, содержащаяся в «пакетах импульсов»

При наличии двух параллельных приемников, всего на приеме получаем 16 каналов комплексной амплитуды (32 реальные переменные), также в пакет входят независимые переменные, определяющие время t , частоту f , местоположение антенны (X , Y) и ее ориентацию для каждого распознанного эха. Кроме того, есть значения ослабления приемника (множители, кратные 4 дБ), которые необходимы, чтобы описать полный динамический диапазон системы в 160 дБ. Оцифровка происходит с интервалами 10 μ s (1.5 км по расстоянию) в течение выбранного интервала, обычно 70 - 800 км после излучения импульса. Кроме того, несколько значений, взятых перед передачей импульса, используются для характеристики радишума на данной частоте импульса.

Окончательная информация включает все данные ионограммы диназонда, полученные непосредственно из обработки принимаемого сигнала. К ним относятся:

1. координата отражения (XL) эха в восточном направлении, по разнице фаз

антенн на оси восток-запад;

2. в северном направлении координата отражения (Y_L) на оси север-юг;
3. групповой путь по методу стационарной фазы («SPGR» или R'), рассчитанный по разнице фаз для малых приращений частоты в пределах пакета;
4. значение доплеровского смещения (в конечном счете V^* в м/с) по разнице фаз между импульсами в различное время;
5. вращение эллипса поляризации эха (PP) по различию фаз на ортогональных антеннах;
6. фаза или фазовый путь (R^* или RS , обычно в градусах);
7. оценка погрешности фазы по методу наименьших квадратов для значений, рассчитанных по различным комбинациям антенн;
8. средняя пиковая амплитуда (A , обычно в дБ); а также шумы, тоже в дБ.

Эти восемь основных величин в совокупности являются «эхом» в идеологии диназонда. Также рассчитываются различные дополнительные параметры (например, зенитный и азимутальный углы).

Размер записи при использовании стандартного метода распознавания "PEAKS" (файл с расширением «.B_G») обычно меньше 100 Кб.

Другой алгоритм распознавания и параметризации – PRETEC

Указанные выше параметры зависят, в основном, от разницы фаз, определяемой независимыми переменными времени, антенны и частоты (но они включают также среднюю фазу и пиковую амплитуду). Можно использовать их для разделения собственно сигналов и радиошумов.

После применения к сырым данным алгоритма преобразования, который приводит к определению восьми первичных параметров приемного сигнала, во всех точках кроме действительного отражения набор полученных значений будет бессмысленным. В пределах эха последовательные значения параметров довольно устойчивы. Данные качества используются для распознавания эха и отличия его от фронта импульса. Такой подход и составляет основу алгоритма PRETEC. Показано, что отбор эха слабо зависит от критериев стабильности и стабильность четырех 10- μ s отсчетов комплексной амплитуды является достаточной, чтобы точность определения отражений увеличилась примерно до 60% по сравнению с методом "PEAKS". Дополнительно определяются главным образом те отражения, которые из-за близости к другому отражению не приводят к различным пикам амплитуды. Кроме того, параметры эха могут быть представлены с большей точностью их взвешенными значениями, используя полученные локальные амплитуды в качестве весов.

Очевидно, что для работы PRETEC требуется вся информация «пакета». В случае возможности предоставить информацию индивидуальных «пакетов» компьютеру для анализа данных в режиме реального времени, PRETEC также в режиме реального времени успевает обработать ее и выделить интересующие нас отражения.

Размер записи при использовании метода распознавания "PRETEC" (файл с расширением «.BPG») порядка 30 Мб в незаархивированном виде.

Высокоуровневый анализ данных

Последующие исследования проводятся с использованием различных основных физических данных. К ним относятся:

1. Классификация отражений, которые объединяются в классы или "следы" по подобию эхолокации, доплеровскому сдвигу, поляризации и т.д.
2. Инверсия $R'(f)$ в «реальную высоту» профиля $f_p(h)$, где f_p – плазменная частота, непосредственно связанная с электронной плотностью, $N_e = 1.24 \cdot 10^{10} f_p^2 \text{ м}^{-3}$. Ранее процедуры инверсии (подобно POLAN) предполагали строго вертикальное распространение зондирующего сигнала, которое, как демонстрируют результаты работы диназонта, встречается достаточно редко. Новые разработанные методы инверсии (например, «NeXtYZ») используют полную лучевую информацию.
3. Векторные скорости по значениям доплеровского смещения и геометрии отражения, сортируя отражения по группам или классам, затем отображаемым на экране. В общем случае возможны различные варианты выбора данных.
4. Анализ фазовой структурной функции, приводящий к оценкам амплитуды неоднородностей, и значения спектрального индекса ν , для каждого классифицированного следа или для совокупности следов областей ионосферы.

Классификация отраженных сигналов

Процедура классификации, позволяющая объединять одиночные отражения в динамические классы или «следы», работает следующим образом. Отражения сохраняются в последовательной записи, упорядоченной по времени прихода или частоте. Для каждой записи атрибуты "нового" j -го эха сравниваются со значениями атрибутов для каждого ранее распознанного следа. Эти значения атрибутов следа описывают его текущий конец. Находится соответствие нового эха по отношению к существующим следам, и, если соответствие "достаточно хорошо" (т.е. попадает в заданные границы по всем параметрам),

эхо заносится в этот след, автоматически обновляя атрибуты следа. Если новое отражение не соответствует никакому следу в пределах выбранных допусков, создается новый след. Особенность процесса классификации состоит в том, что атрибуты эха изменяются в пределах каждого следа.

$N(h)$ анализ

Термин « $N(h)$ инверсия профиля» подразумевает только высотную зависимость, получающуюся в предположении строго вертикального распространении зондирующих сигналов. Один из наиболее известных среди таких методов – «POLAN». Однако с точки зрения методов диназонда данное предположение становится устаревшим.

При ручной обработке аналоговых ионограмм, на которых можно было отследить только зависимость времени распространения от частоты, было весьма естественно предположение о вертикальном распространении. Диназонд, однако, благодаря своим методам комплексного анализа фазы импульса, обеспечивает определение направления прихода для каждого радиоэха вместе с точным временем распространения (виртуальная дальность, R'), а также других параметров, описанных выше. Эти результаты показывают, что строго вертикальное распространение, принимаемое ранее за основу, является относительно редким случаем. Трехмерные иллюстрации эхолокации ярко показывают фактические свойства трехмерного неоднородного распределения электронной плотности (рисунок П1.5). Поэтому процедура инверсии, используемая в диназонде, обязана возвращать эту информацию.

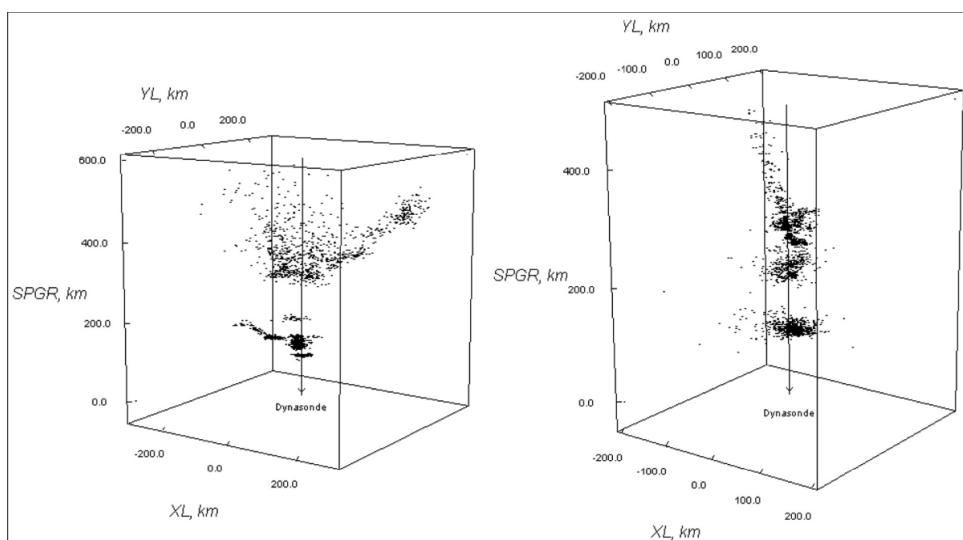


Рисунок П1.5 - 3-D результаты зондирования, обработанные процедурой dynasonde-21 в Tromso (слева) и в обсерватории Bear Lake, штат Юта (справа)

С этой целью была разработана 3-D программа инверсии («NeXtYZ-full»), представляющей ионосферу в «клиновидно-стратифицированной» форме (КСИ) описания.

Результатом является набор параметров КСИ, эквивалент высотной зависимости. Эти параметры включают f_{pi} , h_i , n_{xi} , n_{yi} . Направление общего градиента в слое определяется нормалью к поверхности.

Диагностика неоднородностей

Простые ионограммы соответствуют почти идеальным условиям состояния ионосферы (вертикально-стратифицированная горизонтально-однородная среда). Наличие неоднородностей приводит к получению сложных ионограмм. Зондирование ВЧ-сигналами показывает высокую чувствительность к градиентам электронной концентрации, особенно вблизи уровня отражения. Оно выявляет наличие неоднородностей в широком диапазоне пространственных масштабов. Диагностические возможности ионограммы ограничиваются пространственным спектром, начиная с размеров порядка длиной волны (~ 0.1 км) и заканчивая высотами самой ионосферы (~ 1000 км). Диагностические проблемы, связанные с большими масштабами, не представляют сложности; неоднородности, значительно больше нескольких десятков километров, обнаруживаются еще в процессе обработки первичных данных. Их характеристики приводятся в виде таблиц.

Анализ структурной функции фазы

Масштабы от 0.1 км до нескольких десятков км важны из-за связанных с ними эффектов "радиомерцания" на всех используемых частотах и оказывают большое влияние на результаты измерений диназонда, которые можно использовать в качестве диагностических методов. Один из них, основанный на оценке временного запаздывания "структурной функции фазы" ("SFp"), проводится для каждой ионограммы диназонда. SFp опирается на среднеквадратичные изменения фазы, происходящие за короткие промежутки времени в течение одного пакета импульсов. Значения доплеровского смещения отражений (иначе определяемого как V^* м/с) за время, равное межимпульсному периоду, обычно 0.01с, являются такой выборкой. В log-log координатах зависимость обычно является линейной, таким образом можно определить и среднее значение, и погрешность SFp для каждого следа или группы следов.

SFp важен, поскольку он связан с пространственной структурной функцией ионосферных неоднородностей, которые и вызывают наблюдаемые колебания фазы. Степенная форма спектра среднего поля неоднородностей ($\Phi(k_{\perp}) \sim k_{\perp}^{-\nu}$) в настоящий момент считается основной для масштабов порядка одного километра. Оба параметра пространственного спектра могут быть определены по SFp и, обозначенные как SPAMx и SPINx, представляются в общих таблицах для каждой ионограммы отдельно с $x = E$ и $x = F$

для соответствующих областей.

Аномальное ослабление и калибровка амплитуды

Поскольку оптическая толщина для рассеивания неоднородностями промежуточного масштаба часто значительно больше 1, это подразумевает разнообразие рассеивания, которое вызывает пространственно-угловое перераспределение лучевого потока. В результате, значения средней интенсивности и углы прихода сигнала могут значительно изменяться, что приводит к эффекту «аномального ослабления» в окрестности передатчика.

Практически, абсолютные измерения аномального ослабления требуют уникальных методов калибровки амплитуды. Стандартные калибровки не являются подходящими, поэтому мы осуществляем новый метод калибровки амплитуды на основе выбора самых интенсивных отражений для каждого диапазона частот, используя месячный ряд измерения. Используются только ночные данные, что позволяет исключить поглощение в D-области. Идея состоит в том, что в этот период должны попасть несколько моментов с незначительной амплитудой неоднородностей. Из приблизительно 10^5 отражений в месяц на каждой частоте, мы выбираем 50 самых высоких ночных амплитуд с ограничением, что их *предполагаемое отклонение от вертикали* $< 1^\circ$. Показано, что амплитуды в пределах этих «Лучших 50» отражений изменяются очень слабо, что можно считать проверкой правильности этой процедуры выбора. Наконец, частотная зависимость «Лучших 50» средних значений служит калибровочной кривой, очищенной от влияния механизмов ослабления. Оценки аномального эффекта ослабления могут быть получены для каждой частоты путем сравнения средней амплитуды отражений со значением калибровки. По результатам можно получить параметры спектра неоднородностей.

Представление результатов работы «Диназонда-21»

Основным механизмом представления полученных результатов является графическая ионограмма, которая строится в режиме реального времени (рисунок П1.6). На ней представлены графики частотной зависимости семи из восьми основных параметров каждого эха (за исключением среднего значения относительной фазы R^*) и характеристика шумов. Кроме того, на ионограмме показан также восстановленный процедурой инверсии профиль плазменной частоты $f_p(h)$.

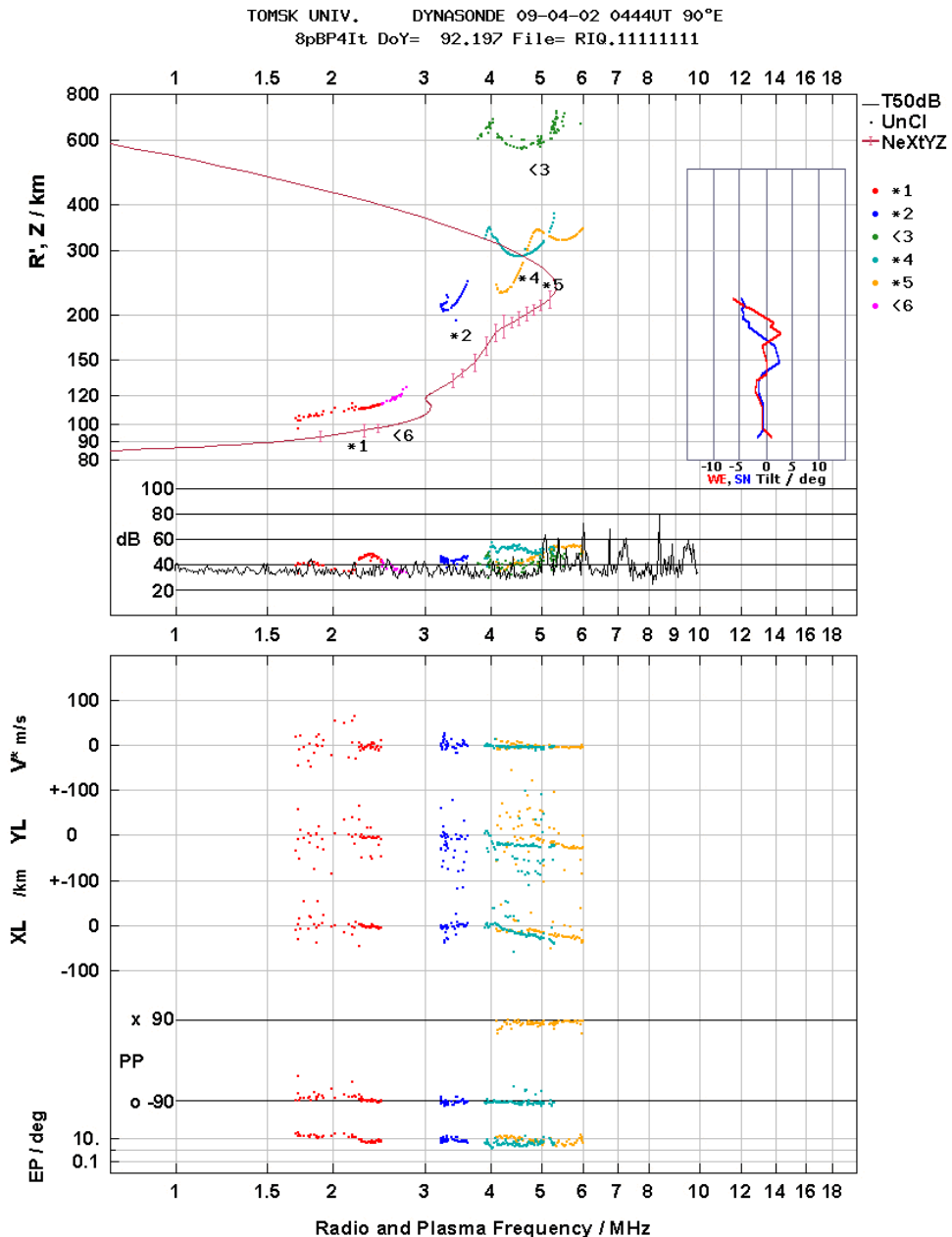


Рисунок П1.6 - Представление полученных результатов работы Диназонда-21 в форме графической ионограммы

Программа обработки позволяет автоматически передавать полученные результаты на сайт в Интернете при его наличии.

На рисунке П1.6 показана ионограмма, состоящая из двух частей с общей горизонтальной осью для представления частот f (МГц), и f_p (МГц) в логарифмическом масштабе.

Заголовок содержит стандартные данные, характеризующие расположение станции, время наблюдения и название текстового файла, с данными ионограммы: станция наблюдение (Tomsk Univ.), ее широта (90°E – в.д.), тип оборудования (DYNASONDE), дата и время (UT) проведения наблюдения (09-04-02 0444UT – 2 апреля 2009 г., 04.44 по Гринвичу),

точное время в днях с начала года (DoY=92.197), название файла сохранения информации (RIQ.11111111), характеристики режима зондирования (8pBP4It – 8 импульсов в наборе, блочный режим с 4-мя повторениями, режим ионограммы).

На ионограмме представлены все распознанные в текущем сеансе отражения, сгруппированные по следам. Каждому отражению на любом из графиков соответствует отдельная точка. На одной частоте может присутствовать несколько распознанных эхосигналов. Обычно их число возрастает с увеличением возмущенности ионосферы, что также может служить критерием состояния среды.

Верхняя часть ионограммы

Введены некоторые усовершенствования: 1) представление $R'(f)$ в *log-log* системе координат для сохранения относительной точности отображения (в %). Это позволяет передавать детали в Е-области и в какой-то мере исправлять искажение значения «h'» вблизи критической частоты. 2) Использование на графиках значений с плавающей запятой обработки данных РС; графическая система предоставляет возможность неограниченного увеличения этих графиков, что позволяет оценить гладкость и разрешение, достигаемые, например, для зависимости группового пути методом стационарной фазы от частоты (где разрешающая способность – 100 Гц). Конечно, возможность изменения масштаба изображения отсутствует в GIF-формате, используемом для представления графических данных в Интернете. Но эта опция доступна в Java-версиях ионограмм.

В Интернет-представлении ионограмм диназонда следы отражений (см. выше) отличаются цветами (до 20), но они не имеют никакого дальнейшего значения, потому что следы также пронумерованы ($1:J_{max}$) в легенде рисунка для удобства различных сравнений. Следы могут быть помечены несколькими способами: «*» показывает, что след был выбран для процедуры инверсии (см. ниже); «<» показывает, что след не пригоден для процедуры инверсии (например, Z-следы) и для большинства других целей (например, следы «кратных отражений»). На самом рисунке номер следа расположен в районе середины его частотного диапазона и немного ниже.

На амплитудной панели (Y-ось, обозначенная знаком 'dB') представлены кривые калибровки "Лучших 50" (черная линия **T50dB**), уровень сигнала вместе с шумом в децибелах в зависимости от радиочастоты. Абсолютные численные значения амплитуд не имеют физического смысла: это просто $10 \cdot \log(x^2 + y^2)$, где x и y – отсчеты квадратурных компонент на выходе аналого-цифрового преобразователя в пике эха после учета динамического диапазона аттенюатора приемника. Уровень шумов для каждого «пакета» определяется перед излучением импульса. Вычисление значений "Лучших 50" и расчет

калибровочной кривой происходит один раз в сутки, около 00:00 UT, на основе базы данных за предыдущие 30 дней. Эти результаты – единственный вид информации, полученный усреднением наблюдений за длительный период времени.

Поскольку классификация эхо зависит от набора допусков, некоторые отражения не поддаются классификации (не попадая в пределы допусков существующих следов), они отображаются на графике черным цветом и в легенде им присваивается значение «UnCl».

Профиль плазменной частоты $f_p(h)$, рассчитанный процедурой NeXtYZ, совмещен с ионограммой $R'(f)$ в $\log\text{-}\log$ координатах, интерпретируя горизонтальную ось как плазменную частоту (см. выше), и вертикальную координату как "реальную" высоту. Процедура инверсии профиля выбирает модельные значения для двух параметров E-F долины (ширина долины и глубина), и, используя разницу в запаздывании O и X компонент, модифицирует их. Подобный контроль происходит и для ненаблюдаемой части ночной ионизации, лежащей в основании F-области на основе O и X данных F-области. После построения графика профиль F-области экстраполируется на некоторое расстояние выше максимума, предполагая, что в окрестности и выше максимума он описывается модельным слоем Чепмена. При расчете ТЕС нижняя часть bТЕС находится путем интегрирования, а вклад верхней части tТЕС определяется на основе экстраполяции слоя Чепмена.

В правой части приводятся зависимости компонент наклона плоскостей от высоты, рассчитанные процедурой NeXtYZ в предположении «клиновидно-стратифицированной модели»: восточно-западной и южно-северной (n_x и n_y – красная и синяя линии соответственно).

Нижняя часть ионограммы

Особенностью является наличие пяти параметров эха, зависящих от фазы, в нижней части ионограммы. Для всех отражений из верхней части точками в нижней части представлены значения каждого параметра. Эти графики позволяют более наглядно представить геометрическое положение каждого эхо-сигнала, компактность следов в пространстве, скорость их дрейфа. Цветовое обозначение следов совпадает с верхней частью. В порядке по убыванию это следующие параметры:

1. «Doppler» вдоль луча зрения (или скорость изменения фазы), V^* в м/с. Это среднее значение по всему «пакету импульсов» (0.08сек). Таким образом убирается зависимость параметра от частоты или длины волны.
2. Долготный компонент отклонения эхо-сигналов, YL в км от вертикали, положительный в северном направлении.
3. Широтный компонент отклонения, XL в км от вертикали, положительный в

восточном направлении. Эти компоненты получаются при проецировании направления прихода луча на групповой путь R' . Таким образом игнорируются преломление или отклонение от линейного распространения. Модернизируя процедуру инверсии, можно вернуть некоторую 3-мерную ионосферную структуру зависимости XL и YL от частоты способом, аналогичным инвертированию "реальной высоты" из группового пути.

4. Вращение эллипса поляризации эха, PP (правая ось Y). Вообще, вдали от экваториальных широт, отраженные сигналы обладают почти круговой поляризацией. PP – мгновенное различие фазы между ориентированными на север и на восток антеннами принимающей решетки диназона, $\sim -90^\circ$ для *обыкновенного* типа поляризации, и $\sim +90^\circ$ для *необыкновенного*.
5. Погрешность определения фазы, EP (град). 6 фазозависимых параметров эха определяются по 16 значениям фазы методом наименьших квадратов; EP – оценка погрешности, которая, умноженная на диагональные элементы решения матрицы ковариации, определяет достоверность каждого параметра. Обычно при обработке данных диназона устанавливается верхний предел (в настоящее время $E_{plim} = 16^\circ$) для исключения из дальнейшего рассмотрения ненадежных отражений.

Одновременно с визуальным представлением информации формируется набор файлов, содержащих информацию о каждом отражении, а также восстановленный профиль электронной концентрации.

Определение группового пути и углов прихода по измерениям фазы

Частота оцифровки комплексной амплитуды на приемнике составляет 100 кГц. В терминах «действующей высоты» это соответствует 1.5 км. В результате определяются квадратурные компоненты комплексного сигнала I и Q . Из них по известным формулам находятся амплитуда сигнала:

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2}$$

и его фаза

$$\varphi = \arctg(I/Q).$$

Точность определения фазы зависит от точности определения квадратурных компонент и может быть повышена с учетом приема на нескольких антеннах и частотах. Обычно погрешность фазовых измерений не превышает 1° .

Предположим, что плоская волна произвольной поляризации отражена от ионосферы

и получена линейно-поляризованной антенной. В точке, которую мы будем использовать как начало координат ДПСК, ориентация волны дается единичным вектором $\mathbf{w}$ в направлении волновой нормали, которая в свободном пространстве является также направлением распространения. Вектор распространения тогда определяется как

$$\mathbf{k} = \frac{\omega}{c} \mathbf{w} = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{w}.$$

Фазовый путь и волновая нормаль могут быть объединены в векторе фазового пути $\mathbf{p}^*$, выходящем из начала координат

$$\mathbf{p}^* = -p^* \mathbf{w}.$$

Пространственное изменение φ_i , наблюдаемое на антенне, расположенной в точке с координатами $\mathbf{d}_i$, теперь можно выразить формулой

$$\varphi_i = \mathbf{k} \cdot (\mathbf{d}_i - \mathbf{p}^*) = \frac{2\pi}{\lambda} (\mathbf{w} \cdot \mathbf{d}_i + p^*).$$

Поэтому, если измерено пространственное изменение φ_i , то направление распространения волны может быть определено следующим образом

$$\mathbf{w} = \frac{\lambda}{2\pi} \text{grad } \varphi.$$

Прямое определение группового пути p' по времени задержки (отсчета) дает точность не более 1,5 км (эта величина получается при переводе частоты оцифровки в «действующую высоту»). Увеличение точности можно достичь, используя значения фазы сигнала. Для этих целей в окрестности базовой зондирующей частоты излучаются несколько (обычно 8) коротких импульсов на близкорасположенных частотах (см. раздел 4).

Остановимся на этом более подробно.

Известна связь “группового коэффициента преломления” μ' с “волновым коэффициентом преломления” μ

$$\mu' = \mu + f \frac{\partial \mu}{\partial f} = \frac{\partial}{\partial f} (\mu f).$$

На произвольной высоте z импульсный сигнал конечной длительности можно представить в виде интеграла Фурье:

$$E(t, z) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f) \exp \left\{ 2\pi i f \left(t - \frac{1}{c} \int_0^z \mu dz \right) \right\} df,$$

который может быть оценен для любых значений t и z . Под интегралом стоит быстроосциллирующая функция. Из принципа “стационарной фазы” следует, что основной вклад в него дает окрестность стационарной точки, где наблюдается экстремум подэкспоненциальной функции:

$$\frac{\partial}{\partial f} \left\{ ft - \frac{1}{c} \int_0^z \mu f dz \right\} = 0$$

Определим τ как время, затраченное импульсом на распространение от поверхности до уровня отражения и назад. Величина $c\tau/2$ называется эквивалентной высотой отражения и обозначается $h'(f)$, так как она является функцией частоты f . Это – высота, на которой импульс отражался бы, если бы он распространялся с постоянной скоростью c .

Предположим, что волна отражается на уровне $z = z_0$, где $\mu = 0$. Так как μ зависит от частоты f , то $z_0(f)$ – также функция частоты. Поле отраженной волны, достигающей земли, записывается в виде

$$E(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f) \exp \left\{ 2\pi i f \left(t - \frac{2}{c} \int_0^{z_0(f)} \mu dz \right) \right\} df.$$

Значение τ – то значение t , при котором подынтегральное выражение имеет постоянную фазу для частоты f . Следовательно, исходя из условия «постоянной фазы»

$$\left[\frac{\partial}{\partial f} \left\{ f \left(\tau - \frac{2}{c} \int_0^{z_0} \mu dz \right) \right\} \right]_{f=f_1} = 0,$$

так, что

$$c\tau = 2 \int_0^{z_0} \left\{ \frac{\partial}{\partial f} (f\mu) \right\}_{f=f_1} dz + 2f_1 \mu(z_0) \left\{ \frac{\partial z_0}{\partial f} \right\}_{f=f_1}.$$

Здесь $\mu(z_0) = 0$, а $\partial z_0 / \partial f$ конечно. Таким образом, второе слагаемое является нулевым и остающееся слагаемое записывается в виде

$$h'(f) = \int_0^{z_0(f)} \mu' dz.$$

Это – “действующая высота” отражения.

Фаза волн, возвращающихся назад после отражения, дается интегралом фазы

$$2k \int_0^{z_0} \mu dz = \frac{4\pi}{\lambda} \int_0^{z_0} \mu dz = 2kh(f).$$

Интеграл обозначается $h(f)$, которую называют “фазовой высотой” отражения. Учитывая связь коэффициентов преломления, формула которой приведена выше, можно записать зависимость “действующей высоты” от фазовой:

$$h'(f) = h(f) + f \frac{\partial h(f)}{\partial f}.$$

Или, используя обозначения группового пути и фазы,

$$p' = c \frac{d\varphi}{d\omega}.$$

Точность определения “действующей высоты” таким методом зависит от точности определения фазы. Если ее погрешность не превышает 1° , то разрешение по высоте

находится в диапазоне нескольких метров.

В диназонде фазы измеряются на восьми близко расположенных антеннах, расположение которых задается координатами $\mathbf{d}_i$ для близко расположенных частот. С учетом этого производные можно заменить конечными приращениями. Эти приближения остаются допустимыми, если радиосигнал исходит из точечного источника при условии, что расстояние между антеннами $\Delta \mathbf{d}$ мало по сравнению с длиной пути распространения и что частотное различие Δf также является малым по сравнению с радиочастотой

$$|\Delta \mathbf{d}| \ll p'$$

$$|\Delta f| \ll f.$$

Кроме того, удобно, если расстояния между антеннами и частотный сдвиг являются настолько малыми, что соответствующие различия фазы определяются однозначно (измеряются только в пределах одного периода, т.е. в диапазоне $0-2\pi$). Обычно, однако, доступна дополнительная информация, позволяющая удалить неопределенность, связанную с множителями 2π .

Приведенные выше методы определения направления прихода и группового пути справедливы в случае, если измерения фазы проводятся на достаточно близко расположенных частотах и геометрические размеры антенной решетки достаточно малы, чтобы замена производных конечными приращениями была корректна.

Программное решение

Все функции комплекса Диназонда-21 реализованы на современном ПК, который поставляется вместе с системой. Этот компьютер оборудован некоторыми программными продуктами общего назначения: веб-сервером, системой управления базами данных (СУБД), серверными скриптовыми средствами. Веб сервер включён в конфигурацию в основном для поддержки удалённого контроля и возможности администрирования системы через Интернет или локальную сеть. При наличии достаточно быстрого подключения он также может быть использован для доступа к результатам ионосферного радиозондирования посредством Интернета. СУБД обеспечивает локальное хранение данных; она также связывает различные компоненты программного комплекса Диназонда-21, которые используют СУБД для обмена информацией. Благодаря своему реляционному характеру, для исследователя СУБД является удобным инструментом анализа данных. Все специфические функции Диназонда 21 реализованы специализированным программным обеспечением.

Внутреннее хранение данных

СЧ/ВЧ радарная часть системы служит источником первичных данных в форме оцифрованных квадратурных компонент (время задержки) для каждого передающего/принимающего канала и для каждого импульса. Данные считываются с определённой периодичностью записывающим модулем аналитической программы и временно сохраняются в отдельный файл для каждого сеанса радиозондирования (ионограммы). По причине большого объёма первичных данных, они не сохраняются на постоянной основе. Однако есть возможность выборочно скопировать данные на DVD-носитель для дальнейшей обработки.

Результаты каждого этапа анализа, начиная от распознавания эха, а также вся конфигурационная информация некоторое время хранятся в локальной базе данных (обычно 2-3 месяца). Они затем могут быть перемещены на другой носитель, например, DVD.

Также есть опция копирования наиболее свежих результатов анализа напрямую на DVD. Получить доступ к находящимся в локальной базе различным результатам анализа и метаданным можно несколькими способами. Во-первых, через поставляемый HTTP интерфейс, сходный с тем, который описан ниже в разделе «Централизованное архивирование и доступ к данным». С системой поставляется инструментарий для получения и вывода данных, основанный на технологии SQL и по большей части носящий статус свободно распространяемого программного обеспечения. И, как часть «комплекта инструментальных средств для разработчиков», предоставлены библиотеки функций, которые осуществляют работу с базами данных Диназонда 21. Эти функции могут быть использованы в пользовательских приложениях.

Передача данных в центральную базу данных.

Результаты каждого сеанса зондирования сразу извлекаются в виде файлов формата XML (формат Стандартного Ионосферного Файла Данных – Standart Ionosonde Data File format) из базы данных при помощи специального скрипта. Файлы проходят процесс сжатия и отсылаются через безопасные RTP соединения в центральное хранилище и определённым пользователям, которые нуждаются в оперативной ионосферной информации. Формат XML позволяет легко переводить данные из одной СУБД в другую без использования специализированного программного обеспечения.

Данная особенность предоставляет удобную возможность использовать Диназонд 21 в качестве опорного пункта в общей сети наблюдений с последующей автоматической передачей данных в центр совместной обработки.

Централизованное архивирование и доступ к данным

Хранение результатов анализа данных в локальной СУБД раскрывает широкие научные возможности. Однако, как и везде в геофизике, существенные сдвиги появляются при возможности анализировать широкий (и даже глобальный) круг данных, сравнивать данные разных регионов и работать с долговременными массивами данных. Следовательно, один из наиболее предпочитаемых режимов работы Диназонда 21 может включать в себя регулярную передачу данных в централизованное хранилище данных (Центр Данных), предоставляя к ним доступ для научного сообщества через сеть. Такой сервис предоставляет результаты анализа в формате, который определяется заказчиком через интерактивную сессию.

Рабочий прототип такого центрального хранилища для существующих станций был создан посредством заказных работ в NOAA/NGDC. Доступ к базе данных предоставляется через сайт ионозонда (например, <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/IONO/Dynasonde/>).

Принципы работы веб сервиса

Домашняя страница зарегистрированного пользователя базы данных Диназонда 21 представлена на рисунке П1.7.

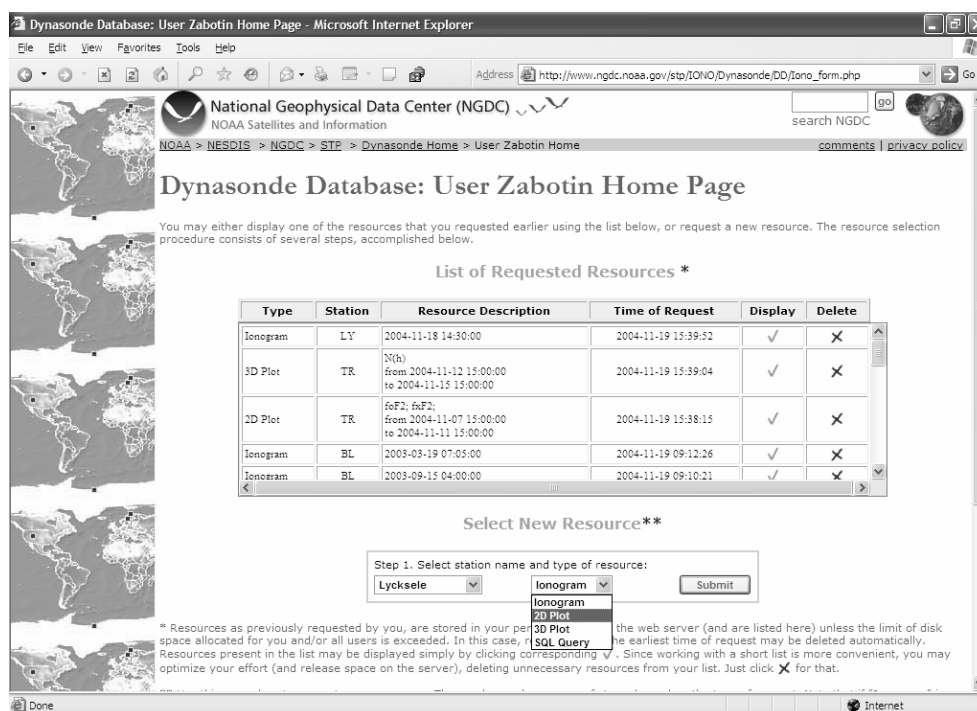


Рисунок П1.7 - Персональная страница зарегистрированного пользователя

Она предусматривает возможность сохранения в личной папке на сервере и отображения на личной странице всех данных, затребованных пользователем ранее. Эта особенность облегчает повторный вызов ранее просмотренных результатов.

Запрос новых данных обеспечивает специальная интерактивная процедура. Для удобства он разбит на несколько этапов. Число и последовательность шагов зависят от типа запроса.

При выборе опции «Ionogram» появляется изображение требуемой ионограммы, одновременно предоставляется доступ ко всему набору результирующих данных по этому конкретному сеансу зондирования в их различных графических форматах. Запрос данных типа «2D Plot» приведёт к отображению временного ряда для различных ионосферных характеристик и также предоставит численные данные в текстовом формате. Выбор «3D Plot» осуществляется для параметров, зависящих от времени и от какого-либо другого параметра (например, плазменная частота и амплитуда неоднородности). «SQL Query» строит запрос, используя шаблоны простого меню для получения нестандартных рядов данных с произвольными условиями и без временного ограничения.

Получение данных и визуальные средства

Результатом почти всех запросов к локальной или централизованной базе данных является текстовый файл с данными или какой-либо графический материал, отображаемый прямо в Интернет-браузере. Прямые графические презентации позволяют экономить время во время получения данных. Они также помогают наблюдать за работой станции и легко получить доступ к последним данным зондирования. Это особенно важно для локального пользователя, если станция подключена в локальную сеть без Интернета или скорость соединения с Интернетом слишком низка для передачи данных в централизованный архив в режиме реального времени.

Выводы

1. Динамический цифровой ионозонд «Диназонд-21» является ионозондом нового поколения.

Он развивает основные принципы вертикального зондирования ионосферы на базе современного оборудования и программного обеспечения.

Отличительными особенностями идеологии Диназонда являются:

- незначительные помехи для других пользователей радиодиапазона;

- бережное отношение и максимально полное использование физических свойств сырых данных в процессе их обработки;
- разнообразные методы обработки данных высокого уровня.

В отличие от других ионозондов, в идеологии диназонда каждый отраженный от ионосферы сигнал рассматривается как индивидуальный объект («радиоэхо»). Поэтому входные данные являются полными и оптимальными.

2. Вся обработка проводится автоматически, используя данные ионограммы.

Важно также отметить, что к аппаратуре, входящей в комплект оборудования ионозонда, не предъявляется каких-либо особенных требований, которые могут осложнить ее изготовление.