

На правах рукописи



Безлер Илья Валентинович

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В
ИОНОСФЕРЕ МЕТОДОМ МНОГОЧАСТОТНОГО
ДОПЛЕРОВСКОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ

01.04.03 — «Радиофизика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Иркутск - 2013

Работа выполнена на кафедре радиофизики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Иванов Всеволод Борисович

Официальные оппоненты: Куркин Владимир Иванович,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск,
зам. директора

Демьянов Владислав Владимирович,
доктор технических наук,
доцент,
ФГБОУ ВПО ИрГУПС, г. Иркутск,
профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Национальный исследовательский
Томский государственный университет»

Защита состоится «30» октября 2013г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.074.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет» по адресу: г. Иркутск, ул. Гагарина, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Иркутского государственного университета.

Автореферат разослан «___» сентября 2013г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических
наук, доцент



Б. В. Мангазеев

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Основной причиной, определяющей интерес к изучению ионосферы Земли, является свойство ионосферы влиять на распространение радиоволн. Изучение этого влияния обусловлено растущими требованиями к качеству связи посредством ионосферных радиоканалов, точности позиционирования в системах спутниковой радионавигации, работе радиолокационных систем. Основным фактор, осложняющий учет влияния ионосферы на распространение радиоволн – это наличие в ионосфере неоднородностей и возмущений различной природы, в том числе и антропогенных, а также различных нестационарных процессов.

Метод многочастотного доплеровского радиозондирования активно применяется уже много лет для изучения процессов в ионосфере. Этот метод выделяется среди других методов зондирования ионосферы высокой чувствительностью к изменениям концентрации плазмы на пути распространения сигнала и высокой точностью измерений. Практическое применение данного метода осложняется интегральным характером зависимости доплеровского сдвига по траектории распространения сигнала.

В диссертационной работе предлагается методика обработки данных многочастотного доплеровского радиозондирования ионосферы, работа которой демонстрируется методом компьютерного моделирования, в частности, на примере анализа данных эксперимента «Экваториальный триггер». Полученные результаты расширяют методическую базу доплеровских методов зондирования, а также дают полезную информацию о динамике экваториальной ионосферы и искусственных плазменных образований в ней.

Цель работы

Целью настоящей работы является развитие методов обработки данных многочастотного доплеровского зондирования, применительно к

нестационарным процессам в ионосфере и искусственным плазменным образованиям; применение разработанных методик для обработки и интерпретации экспериментальных данных многочастотного доплеровского радиозондирования ионосферы, полученных в ходе активного эксперимента «Экваториальный триггер»; изучение поведения ионосферы в ходе эксперимента; поиск новых признаков возможности искусственного запуска неустойчивости типа Рэля-Тейлора в вечерней экваториальной ионосфере.

Научная новизна

1. Предложена новая методика представления входных данных для использования в многочастотной доплеровской диагностике. Методика использует кусочно-линейную аппроксимацию исходных данных.
2. Впервые получены численные оценки динамики ионосферного профиля в ходе эксперимента «Экваториальный триггер» и динамики профиля искусственного плазменного облака.
3. Предложенная методика впервые применена для детектирования ионосферных неоднородностей и определения их пространственных параметров по данным многочастотного доплеровского радиозондирования.
4. По результатам обработки данных эксперимента «Экваториальный триггер», обнаружена вертикально перемещающаяся неоднородность в основании F-слоя ионосферы. Оценка параметров обнаруженной неоднородности позволяет считать последнюю «пузырем» ионизации, что подтверждает гипотезу о возможности стимулированного запуска неустойчивости типа Рэля-Тейлора в вечерней экваториальной ионосфере.

Положения, выносимые на защиту

1. Модифицированная методика многочастотной доплеровской диагностики ионосферы и её обоснование с помощью вычислительного эксперимента.

2. Реализация предложенной методики для диагностики ионосферы и искусственных плазменных образований в эксперименте «Экваториальный триггер».
3. Качественные и количественные оценки динамики фоновой ионосферы и искусственных плазменных образований в эксперименте «Экваториальный триггер» и их физическая интерпретация.

Достоверность полученных результатов

Достоверность обусловлена согласованностью полученных результатов с теоретическими представлениями о протекающих в ионосфере процессах и подтверждена решением модельных задач путем компьютерного моделирования.

Научная и практическая значимость

Научная значимость обусловлена тем, что эксперимент «Экваториальный триггер» был одним из последних масштабных экспериментов с инъекцией плазмообразующих веществ в ионосферу, проводимых в нашей стране. Данные, полученные в ходе эксперимента, уникальны, и, как следствие, их анализ сам по себе представляет собой научный интерес. Кроме того, обработка экспериментальных данных новой методикой может дать дополнительное подтверждение теоретических предпосылок, лежащих в основе проведения эксперимента.

Также в настоящее время доплеровская диагностика ионосферы приобретает все больший интерес, что выражается в большом количестве работ по данному направлению в научной литературе. Доплеровская диагностика применяется для широкого круга задач от диагностики ионосферных возмущений до поиска эффектов от тектонических процессов. Предлагаемая в работе методика расширяет область приложений доплеровских методов.

Личный вклад автора

Постановка задач, решаемых в диссертационной работе, формулировалась автором вместе с научным руководителем. Автор лично разрабатывал алгоритмы и программы для анализа экспериментальных данных. Все зависимости и графики были получены с помощью этих алгоритмов. Выводы работы делаются автором на основании этих полученных данных. Анализ и интерпретация полученных результатов выполнены автором совместно с научным руководителем.

Апробация результатов

Основные результаты автором докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях: XXIII Всероссийская научная конференция по распространению радиоволн (г. Йошкар-Ола, 2011 г.); X Международная школа молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А. Г. Колесника (г. Томск, 2012 г.), где работа была отмечена дипломом III степени; XI и XII Байкальские международные школы по фундаментальной физике (г. Иркутск, 2009 г. и 2011 г.); научные чтения памяти Э. Л. Афраймовича (г. Иркутск, 2010 г. и 2012 г.); конференция «Физика и оптика океана и атмосферы» (г. Иркутск, 2012 г.); на научных семинарах Физического факультета Иркутского Государственного Университета.

Работа подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 14.740.11.0078 и соглашение № 8388 федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы).

Публикации

Всего по положениям диссертации опубликовано 7 печатных работ, в том числе 3 работы в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК: журналы «Космические исследования» и «Известия Иркутского государственного университета».

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из 4-х глав, введения, заключения и списка литературы. Общий объем – 115 страниц, 44 рисунка, список литературы из 117 цитируемых источников.

Краткое содержание работы

Во **введении** обсуждается современное состояние проблемы, поясняется актуальность исследуемой темы, сформулированы цели исследования и решаемые задачи, а также излагается краткое содержание работы.

Первая глава посвящена предпосылкам к проведению эксперимента «Экваториальный триггер», его результатам, а также краткому обзору развития доплеровских методов исследования ионосферы в основном применительно к вертикальному зондированию.

Эксперимент «Экваториальный триггер» [1] проводился в сентябре 1991 года в Карибском регионе на борту научно-исследовательского судна «Профессор Зубов». Этот эксперимент был частью большой программы «Активные эксперименты и антропогенные эффекты в ионосфере» [2], проводимой, в частности, Институтом Прикладной Геофизики (ИПГ) совместно с широким кругом других организаций. В рамках проведения совместных научно-исследовательских работ ИПГ и Иркутского университета последнему были переданы первичные экспериментальные данные, использованные в настоящей работе.

В экваториальной ионосфере в вечерние часы создаются благоприятные условия для развития неустойчивостей типа Рэля-Тейлора. В результате в области ниже максимума F-слоя ионосферы возникают области с пониженной концентрацией плазмы, так называемые «пузыри» ионизации [3 – 5]. В течение ночи «пузыри» ионизации заполняют область ионосферы вплоть до высот порядка 1000 км. Следствием присутствия «пузырей» в ионосфере является каскадная генерация неоднородностей различных масштабов. Совместное

присутствие крупномасштабных и мелкомасштабных неоднородностей приводит к появлению эффекта F-рассеяния, проявляющегося в уширении треков ионограмм обратного зондирования и флуктуациях треков на доплерограммах.

В работах [6, 7] были теоретически изучены возможности искусственного запуска образования неустойчивостей типа Рэля-Тейлора в вечерней экваториальной ионосфере до начала их естественного образования. Эксперимент «Экваториальный триггер» проводился, в том числе, и для проверки этой гипотезы. В ходе эксперимента на высоте около 200 км было создано искусственное плазменное облако путем инъекции 50 кг бария, пары которого подверглись фотоионизации. Параллельно, расположенный на борту судна многочастотный доплеровский комплекс проводил вертикальное зондирование ионосферы над кораблем и обратное зондирование плазменного облака на восьми фиксированных частотах в диапазоне от 3 до 11 МГц. Зондирование проводилось короткими сеансами, как до инъекции, так и после. Таким образом, полученные данные содержат информацию о состоянии естественной и возмущенной ионосферы.

Основные заключения по итогам эксперимента описаны в работе [1], в которой приведены оценки параметров возмущения, вызванного созданием плазменного облака, по данным многочастотного доплеровского зондирования. Было показано соответствие наблюдаемых параметров возмущения с модельными условиями возникновения неустойчивости типа Рэля-Тейлора [3 - 5]. Непосредственные наблюдения за дрейфом искусственного плазменного облака также указывали на то, что направление зонального электрического поля было благоприятным для развития «пузыря» ионизации. Кроме того, было отмечено возникновение F-рассеяния раньше, чем в естественных условиях. На основании этих фактов в работе [1] было сделано заключение о подтверждении гипотезы о возможности искусственного запуска генерации крупномасштабных неоднородностей в вечерней экваториальной ионосфере.

Следующий этап обработки данных эксперимента «Экваториальный триггер» описан в работе [8], где была предложена методика диагностики параметров волновых возмущений в ионосфере. Также в работе [8] были представлены результаты попытки восстановления динамики ионосферного профиля с помощью методики, основанной на сведении обратной задачи многочастотного доплеровского зондирования к уравнению Абея [9, 10]. По результатам восстановления динамики профиля было отмечено нарастание градиента концентрации плазмы в ионосфере в области отражения второй и третьей зондирующих частот, что интерпретировалось как признак образования «пузыря» ионизации [8].

В настоящей работе выполняется дальнейшая обработка указанных экспериментальных данных. Это связано, во-первых, с тем, что исходные экспериментальные данные содержат информацию о процессах, протекающих в естественной вечерней низкоширотной ионосфере, не изученных в ранних работах по эксперименту «Экваториальный триггер». Во-вторых, в работах [9, 10], посвященных обратной задаче многочастотного доплеровского зондирования, было наложено ограничение на входные данные в виде требования обращения в ноль доплеровского сдвига на первой зондирующей частоте, что не выполняется для данных эксперимента «Экваториальный триггер». В настоящей работе предлагается модифицированная методика решения обратной задачи, что позволило снять указанное ограничение на входные данные и восстановить динамику как ионосферного профиля, так и профиля искусственного плазменного облака, а также обнаружить в ионосфере вертикально перемещающуюся неоднородность с пониженной электронной концентрацией и определить её параметры.

Вторая глава посвящена обработке экспериментальных данных.

Исходные данные представляют собой оцифрованный с частотой 32 Гц отраженный от ионосферы сигнал, пониженный путем гетеродинирования до частоты 4 Гц, и являющимся квазигармоническим колебанием с переменной

амплитудой и частотой. Первоочередной задачей является определение временного хода доплеровского смещения частоты из первичных данных.

Решение данной задачи методом спектрального анализа, основанного на поиске гармоники максимальной амплитуды в спектре исходного сигнала, не привело к желаемому результату. Это было связано главным образом с тем, что в ионосфере наблюдались нестационарные процессы, выражающиеся в спонтанном возникновении двух и более максимумов в спектре, особенно в

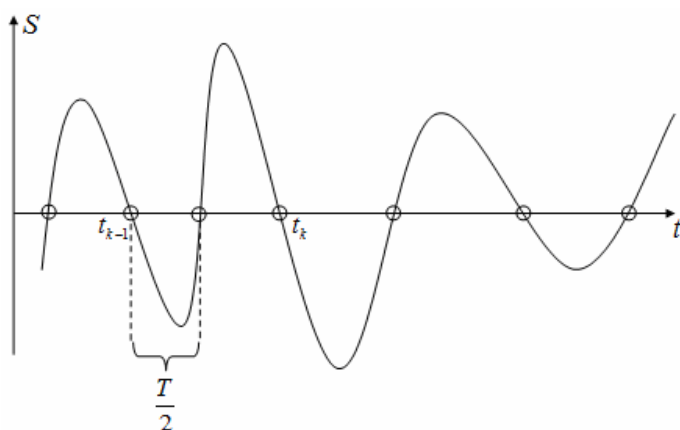


Рис. 1. Пояснения к методике определения доплеровского сдвига частоты.

сеансах, проводимых сразу после создания искусственного плазменного облака. Кроме того, как показал анализ, использование спектрального анализа в данных условиях не обеспечивает хорошего частотного разрешения.

Данную проблему удалось успешно преодолеть путем определения временного хода

доплеровского смещения частоты по следующей методике (рис. 1). В исходном сигнале, представляющем собой квазигармоническое колебание, определялись моменты смены знака сигнала. Время между двумя соседними моментами смены знака сигнала интерпретировалось как мгновенный полупериод колебания, который очевидным образом связан с мгновенной частотой сигнала, разница между которой и частотой 4 Гц интерпретировалась как мгновенное значение доплеровского сдвига частоты.

Применение данной методики позволило повысить частотное разрешение и определить временной ход доплеровского сдвига на всех частотах на протяжении всех сеансов, где это позволяет качество исходных данных. На рис. 2 показан пример временного хода доплеровского сдвига на частоте 8.07 МГц в

сеансе 20:31 местного времени для фоновой ионосферы, определенного по вышеописанной методике.

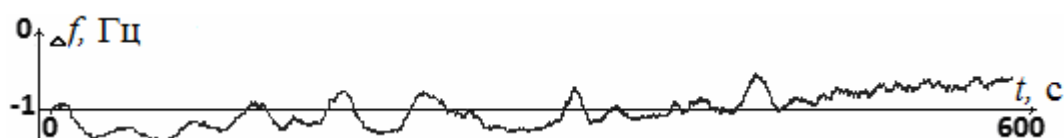


Рис. 2. Временной ход доплеровского сдвига на частоте 8.07 МГц (естественная ионосфера, 20:31 местного времени).

Рис. 2 демонстрирует отрицательное доплеровское смещение частоты около -1 Гц, постепенно смещающееся в сторону положительных значений к концу

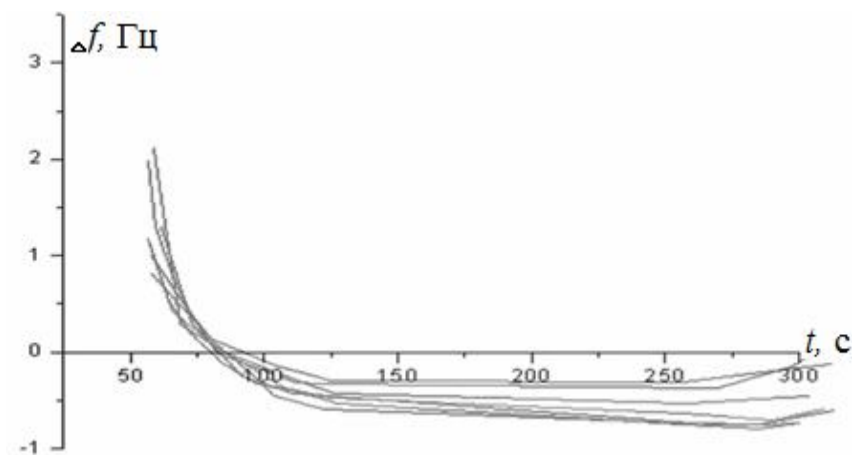


Рис. 3. Временной ход доплеровского сдвига на шести частотах (отражение от искусственного плазменного облака).

сдвига частоты на шести каналах для сигнала, отраженного от искусственного плазменного облака. Хорошо видно, что доплеровский сдвиг быстро уменьшается на всех частотах от значений около +2 Гц до величины около -0.5 Гц, стабилизируясь на этом значении. Такое поведение говорит о высокой скорости протекания процессов в облаке.

Полученный временной ход доплеровского сдвига на разных частотах уже позволяет определить наличие некоторых процессов в ионосфере. В частности, удалось обнаружить периодический характер автокорреляций и

сеанса. Сходная картина наблюдается и на остальных каналах этого сеанса. Полученный результат вполне типичен для вечерней низкоширотной ионосферы.

На рис. 3 приводится временной ход доплеровского

кросс-корреляций временного хода доплеровского сдвига на разных частотах. На рис. 4 приведена автокорреляционная функция временного хода доплеровского сдвига для частоты 10.9 МГц (самый высокочастотный канал) сеанса 19:37 местного времени.

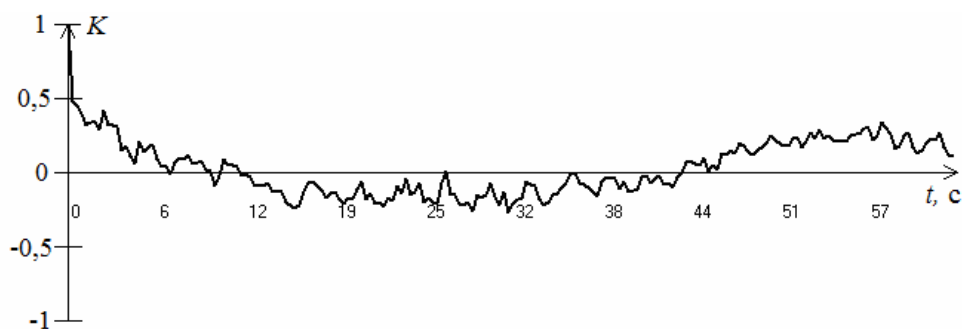


Рис. 4. Автокорреляция на частоте 10.9 МГц естественной ионосферы 20:31 местного времени.

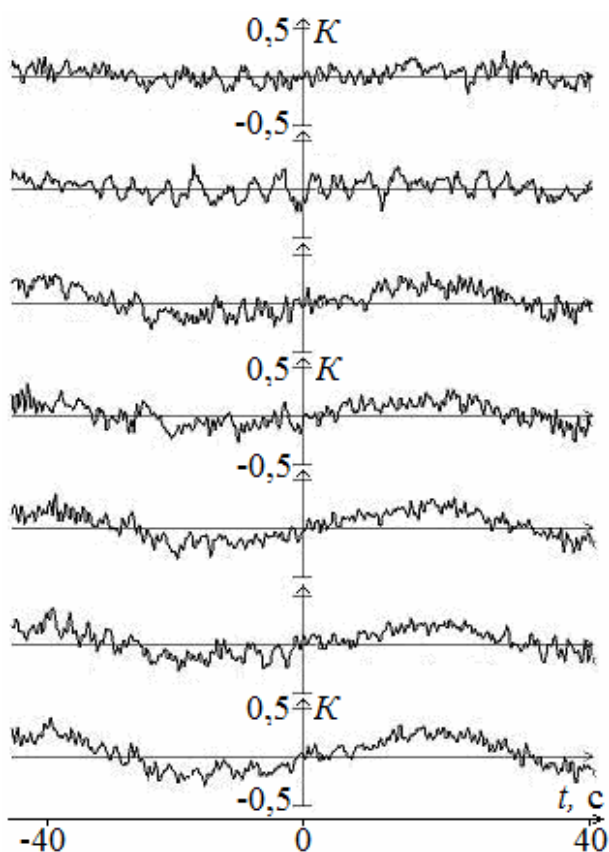


Рис. 5. Кросс-корреляции между высшим каналом и нижними (естественная ионосфера, сеанс 19:37 местного времени, нумерация каналов сверху вниз).

Хорошо виден периодический характер зависимости с периодом около одной минуты. Таким образом, экспериментальные данные позволяют определить наличие периодических процессов в ионосфере в области отражения зондирующей частоты. Подобные зависимости также удалось обнаружить на отдельных каналах в некоторых других сеансах.

Интересный результат был получен при расчете кросс-корреляций. На рис. 5 представлены кросс-корреляционные функции между высшим и всеми остальными каналами сеанса 19:37 местного времени для

естественной ионосферы в одном масштабе. Также хорошо виден периодический характер корреляций с периодом около 1 минуты. Корреляции падают по мере удаления частоты канала от наивысшей, что является вполне ожидаемым. В области отражения верхней частоты происходит волновой процесс, распространяющийся на нижележащие слои, постепенно затухающий. Нужно отметить, что наблюдаемые корреляции относятся к естественной ионосфере без какой-либо модификации. Таким образом, обнаруженный процесс является природным явлением.

Третья глава посвящена описанию методики восстановления динамики ионосферы по данным многочастотного доплеровского зондирования.

Временной ход доплеровского сдвига на разных частотах позволяет восстановить динамику ионосферного профиля. Соответствующая методика, основанная на сведении задачи к уравнению Абеля, подробно рассмотрена в работах [9 - 11]. Основная рабочая формула имеет вид [11]:

$$\Delta z(f) = \frac{c}{2\pi^2} \int_0^f \frac{\frac{\partial \Delta \varphi(f_p)}{\partial f_p} df_p}{\sqrt{f^2 - f_p^2}}. \quad (1)$$

Соотношение (1) позволяет найти изменение высоты отражения сигнала на частоте f , зная зависимость изменения набега фазы $\Delta \varphi(f)$ от зондирующей частоты. Для практического применения на дискретной сетке частот в работах [9, 10] проводилось сглаживание функции $\Delta \varphi(f_p)$ кубическими сплайнами в предположении, что доплеровский сдвиг на нижней зондирующей частоте равен нулю (ионосфера стационарна ниже уровня отражения первой зондирующей частоты). Очевидно, что условия проведения эксперимента «Экваториальный триггер» не удовлетворяют этому требованию.

Данная проблема была решена путем введения в сетку дополнительной частоты, такой, что $f_0 = 0$ и $\Delta \varphi(f_0) = 0$. Чтобы избежать «раскачивания» сплайнов, в формуле (1) была использована кусочно-ломанная аппроксимация

функции $\Delta\varphi(f)$. Тогда производная $\frac{\partial\Delta\varphi(f)}{\partial f}$ будет постоянна между каждыми двумя последовательными фиксированными частотами. Окончательная расчетная формула имеет вид:

$$\Delta z(f_k) = \frac{c}{2\pi^2} \sum_{i=1}^k \frac{\Delta\varphi(f_i) - \Delta\varphi(f_{i-1})}{f_i - f_{i-1}} \arcsin\left(\frac{f_p}{f_k}\right) \Big|_{f_{i-1}}^{f_i}. \quad (2)$$

Для проверки корректности работы методики (2) была проведена серия сравнительных тестов. Тесты представляли собой моделирование развивающегося ионосферного профиля, для которого численно рассчитывалось изменение набега фазы $\Delta\varphi(f_k)$ для каждой из фиксированных частот f_k между двумя моментами времени. Подстановка этих данных в выражение (2) позволяла получить расчетные величины $\Delta z(f_k)$, которые сравнивались с истинными значениями из модели профиля. Также сравнение проводилось с величинами $\Delta z(f_k)$, рассчитанными по методике [9, 10].

Проведенные тесты показали, что в случае, когда выполняется условие обращения в ноль доплеровского сдвига на первой зондирующей частоте, методика (2) уступает по точности методике [9, 10] в среднем на несколько процентов, что является ожидаемым результатом. Также стоит отметить, что применение методики [9, 10] позволяет найти конечный профиль сразу в виде непрерывной функции $\Delta z(f)$, в то время как формула (2) рассчитывает величины $\Delta z(f_k)$ только в конечном числе точек.

Однако тесты показали, что в случае нарушения условия стационарности ионосферы ниже уровня отражения первой зондирующей частоты, расчеты по формуле (2) более точные, чем по методике [9, 10]. В целом, различные тесты показали, что значительная погрешность (20-30%) в определении величин $\Delta z(f_k)$ наблюдается только на первой зондирующей частоте. На последующих частотах точность была, как правило, не хуже 10%. Это объясняется тем, что расчеты по формуле (2) для первой зондирующей частоты дают приближение вертикального смещения ионосферы без изменения формы профиля. Расчеты

для последующих частот имеют большее число членов ряда (2) и более высокую точность. Наибольшая точность наблюдалась для случаев диагностики возмущения, происходящего на фоне вертикально движущейся ионосферы (такие условия складывались в эксперименте «Экваториальный триггер»).

Четвертая глава посвящена обработке экспериментальных данных по методике (2), описанной в третьей главе. На рис. 6 показан результат восстановления динамики профиля по формуле (2) в сеансе 20:31 местного времени для естественной ионосферы.

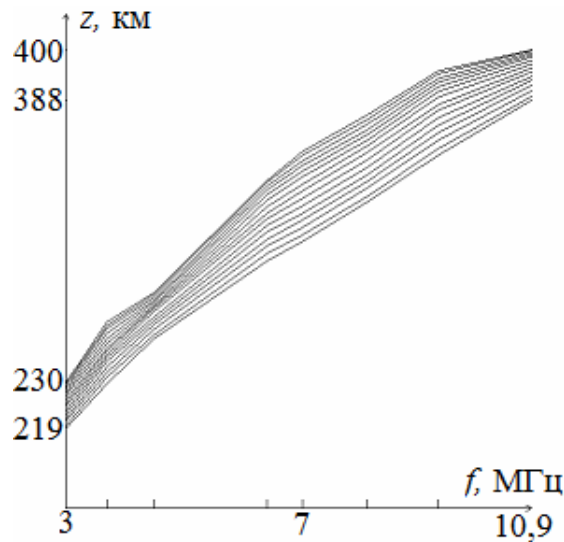


Рис. 6. Динамика ионосферного профиля сеанса 20:31 местного времени.

На рис. 6 кривые построены с интервалом 40 секунд. Начальный профиль (нижняя кривая) был взят из модели NeQUICK. Наиболее значимым явлением, наблюдаемым на рис. 6, является начало развития градиента в районе частоты 4.5 МГц, которое также было обнаружено в работе [11] при использовании другой формы начального профиля. Также из рис. 6 можно определить среднюю скорость подъема ионосферы - около 30 м/с для центральной части.

Градиент может быть объяснен развитием «пузыря» ионизации в нижних слоях ионосферы. Для проверки этой гипотезы были построены временные зависимости изменений высот отражения каждой из зондирующих частот по

методике (2). Такие зависимости для частот 3,7 и 4,5 МГц изображены на рис. 7 пунктирными линиями. Входные данные определялись путем интегрирования временного хода доплеровского сдвига для каждой из частот, определенного во второй главе диссертационной работы.

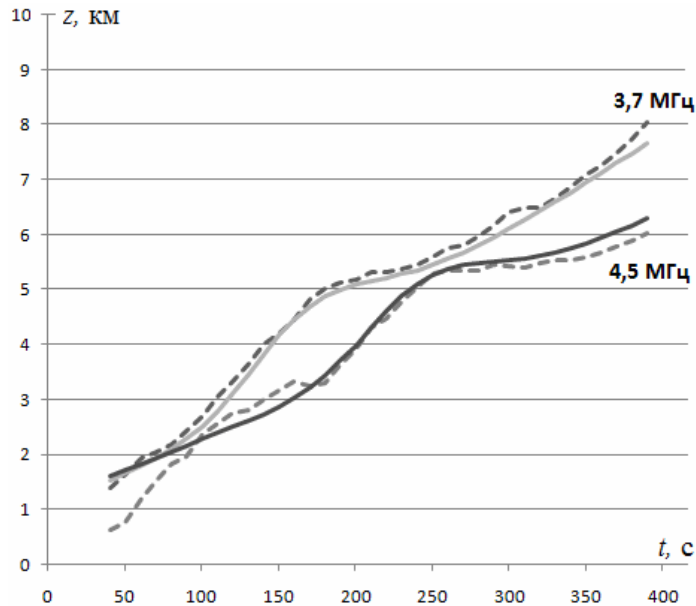


Рис. 7. Временной ход высот отражения 2-й и 3-й зондирующих частот относительно начального профиля (пунктир – экспериментальные данные, сплошные - модельные).

Анализ рис. 7 показал, что кривые для двух соседних частот имеют почти идентичные изгибы, смещенные по времени на величину около 70 секунд. Такой результат может быть следствием наличия в ионосфере поднимающейся неоднородности с пониженной концентрацией плазмы - «пузыря» ионизации. Для проверки этой гипотезы было проведено компьютерное моделирование многочастотной доплеровской диагностики вертикально перемещающейся неоднородности с пониженной концентрацией плазмы на фоне поднимающейся ионосферы. Модель неоднородности была выбрана в виде:

$$f(z, t) = A \exp\left(-\left(\frac{z - z_n(t)}{2(B_0 + a(z - z_n(t)))}\right)^2\right). \quad (3)$$

Выражение (3) задает гауссову модель неоднородности с некоторой асимметрией. Неизвестные параметры в (3) подбирались таким образом, чтобы кривые временного хода высот отражения для частот 3,7 и 4,5 МГц в модели, определенные по формуле (2), приближенно совпадали с аналогичными кривыми, определенными по той же методике из экспериментальных данных. Полученные таким образом с использованием модели (3) кривые изображены на рис. 7 сплошными линиями ($B_0 = 8$ км, $a = -0.1$, $A = 36$ кГц). Из рис. 7 следует, что экспериментальные и модельные кривые достаточно точно совпадают. При этом скорость подъема неоднородности составила величину около 290 м/с, а вертикальный размер неоднородности – около 80 км. Эти величины соответствуют характерным скоростям подъема и размерам «пузырей» ионизации [12]. Таким образом, совместное применение компьютерного моделирования и методики (2) позволило обнаружить вертикально перемещающуюся неоднородность и определить её параметры. Тот факт, что параметры наблюдаемой из экспериментальных данных неоднородности соответствуют параметрам «пузыря» ионизации, является новым подтверждением возможности искусственного запуска неустойчивости типа Рэлея-Тейлора в вечерней экваториальной ионосфере.

Восстановление динамики профиля обратного зондирования искусственного плазменного образования (ионизированного облака) позволяет получить зависимость расстояния до точки отражения сигнала от частоты. Необходимо подчеркнуть, что в данном случае пространственная координата отсчитывается вдоль траектории распространения зондирующего сигнала от передатчика до искусственного плазменного облака и обратно.

На рис. 8 показаны результаты восстановления динамики профиля по методике (2). В качестве начального профиля была выбрана зависимость вида:

$$h(f) = h_0 - \sqrt{-B \cdot \ln\left(\frac{f - f_0}{A}\right)}, \quad (4)$$

со следующими параметрами: h_0 – произвольно, $B = 300$ км, $f_0 = 3.6$ МГц, $A = 7$ МГц. Рис. 8 содержит 9 изображений, на каждом из которых представлен

исходный профиль (гладкая кривая) и профили в каждый последующий момент времени (ломаная кривая). Изображения построены с интервалом 3 с.

На рис. 8 видно, что эволюция облака проходит в несколько этапов. На первом этапе имеет место увеличение концентрации плазмы во всем облаке, проявляющееся как его расширение, что соответствует процессу начального плазмообразования. Это видно на рис. 8(1) как опускание (точнее – смещение на наблюдателя) всего профиля ниже начального. Далее содержание плазмы увеличивается только на нижних частотах, что соответствует перетеканию плазмы из центра облака на периферию. На рис. 8(4) видно, что профиль на нижних частотах лежит максимально низко, в то время как на верхних частотах профиль уже значительно выше начального. В дальнейшем имеет место почти равномерное падение концентрации плазмы во всем облаке, что изображается как подъем всего профиля выше начального.

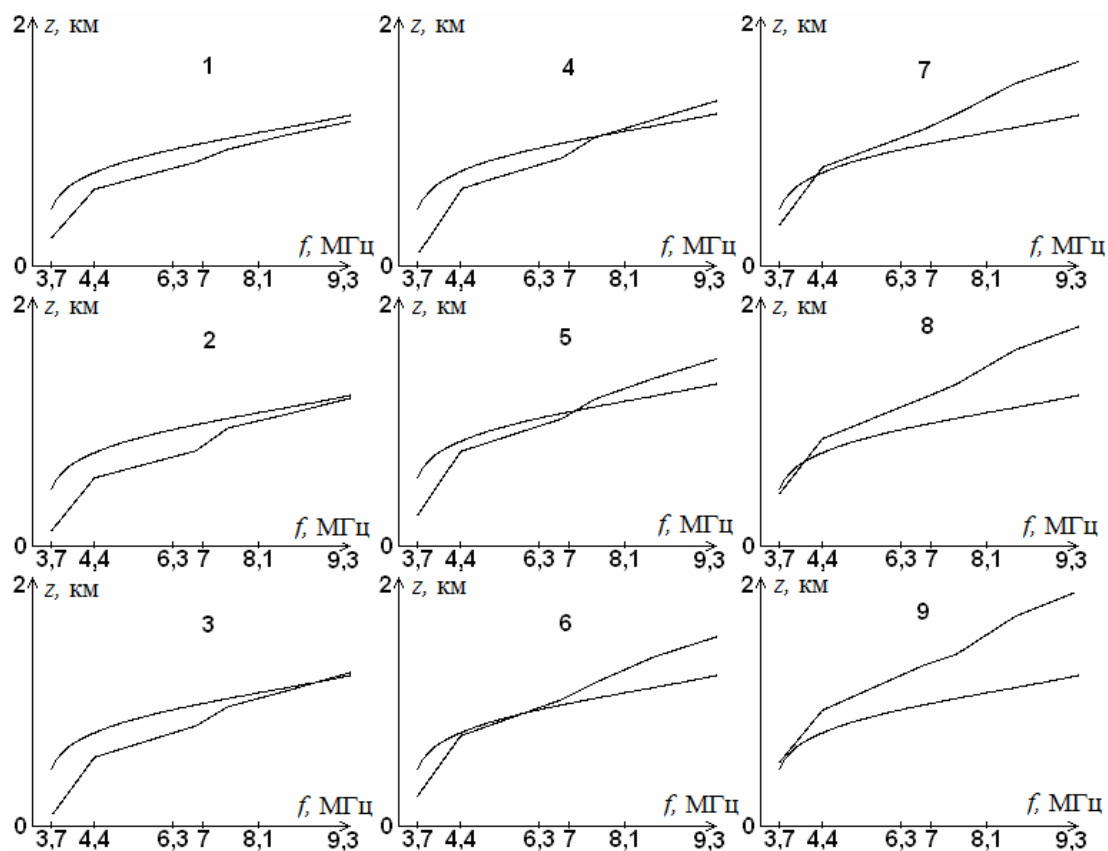


Рис. 8. Динамика искусственного плазменного облака.

Расчетная скорость движения профиля на нижней частоте на первых секундах наблюдения составляла величину в сотни метров за секунду. Далее скорость быстро снижалась на порядок, что согласуется с известными представлениями о развитии плазменных облаков в ионосфере [13]. Количественные характеристики рассматриваемого процесса могут быть полезными для проверки различных теоретических моделей динамики искусственных плазменных образований.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. В работе предложена методика восстановления динамики ионосферного профиля по данным многочастотного доплеровского зондирования с применением кусочно-ломанной аппроксимации исходных данных. Полученная расчетная формула позволяет оценивать изменения высот отражения зондирующих частот в условиях движущейся фоновой ионосферы.
2. С помощью предложенной методики проведено восстановление динамики ионосферного профиля и профиля искусственного плазменного облака по данным многочастотного доплеровского радиозондирования в эксперименте «Экваториальный триггер». Получены качественные и количественные оценки движения различных участков профилей, совпадающие с общими представлениями о динамике вечерней экваториальной ионосферы и искусственных плазменных образований.
3. На основании полученных данных в экспериментальном сеансе обнаружена вертикально перемещающаяся неоднородность с пониженной электронной концентрацией. Предложена методика оценки параметров этой неоднородности. Оценка вертикального размера составила величину 80 км, а скорость подъема – около 290 м/с, что позволяет считать обнаруженную неоднородность «пузырем» ионизации. Этот результат подтверждает сделанные другими авторами выводы по итогам проведения эксперимента «Экваториальный триггер». Также это демонстрирует эффективность предложенного в работе подхода по аппроксимации исходных данных.

4. Применяемая методика для выделения временного хода доплеровского сдвига частоты показала достаточно высокую эффективность по сравнению со спектральным подходом. Корреляционный анализ полученных зависимостей позволил определить наличие периодических авто- и кросс-корреляций в рабочих каналах с периодом около 1 минуты. Этот результат указывает на необходимость дальнейших исследований процессов в вечерней экваториальной ионосфере.

Публикации автора по теме диссертации

1. Безлер И. В. Многочастотное доплеровское радиозондирование ионосферы в эксперименте «ЭКВАТОРИАЛЬНЫЙ ТРИГГЕР» / И. В. Безлер, В. Б. Иванов // Космические исследования. - 2011, - Т. 49(3). - С. 205 – 209.
2. Безлер И. В. Обработка и интерпретация экспериментальных данных многочастотного доплеровского радиозондирования ионосферы в эксперименте «Экваториальный триггер» / И. В. Безлер, В. Б. Иванов // Сборник трудов XI Международной Байкальской Молодежной Школы по Фундаментальной Физике. – Иркутск. – 2009. – С. 62 – 64.
3. Безлер И. В. Многочастотное доплеровское радиозондирование ионосферы / И. В. Безлер, В. Б. Иванов // Сборник трудов XXIII Всероссийской конференции «Распространение радиоволн». - Йошкар-Ола. – 2011. – С. 38 – 42.
4. Безлер И. В. Многочастотное доплеровское радиозондирование ионосферы / И. В. Безлер, В. Б. Иванов // Сборник трудов XII Международной Байкальской Молодежной Школы по Фундаментальной Физике. – Иркутск. – 2011. – С. 52 – 54.
5. Безлер И. В. Доплеровское радиозондирование ионосферы Земли и искусственных плазменных образований в верхней атмосфере / И. В. Безлер, В. Б. Иванов // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». - 2011, - Т. 4(2). - С. 53 – 60.

6. Безлер И. В. Моделирование многочастотной доплеровской диагностики ионосферы / И. В. Безлер, В. Б. Иванов // Сборник трудов X Международной Школы Молодых Ученых имени А. Г. Колесника «Физика окружающей среды». – Томск. – 2012. – С. 33 – 35.

7. Безлер И. В. Компьютерное моделирование многочастотной доплеровской диагностики ионосферы Земли / И. В. Безлер, В. Б. Иванов // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». - 2012, - Т. 5(2). - С. 55 – 60.

Список цитируемой литературы

1. Гайдуков В. Ю. Эксперимент «Экваториальный триггер»: стимулированное развитие плазменных неустойчивостей и неоднородностей в экваториальной ионосфере / В. Ю. Гайдуков, С. А. Намазов, М. А. Никитин, Ю. А. Романовский // Космические исследования. - 1993. - Т. 31. №1. - С. 63 – 70.

2. Авдюшин С.И. Программа «Активные эксперименты и антропогенные эффекты в ионосфере»: организация, аппаратурно-методическое обеспечение, основные результаты исследований / С. И. Авдюшин, Н. В. Ветчинкин, С. И. Козлов, Н. Н. Петров, Ю. А. Романовский // Космические исследования. – 1993. - Т. 31. - вып. 1. - С. 3 - 25.

3. Романовский Ю. А. Об аномалии ионного состава в экваториальной области F2 / Ю. А. Романовский, Л. И. Погуляевский, И. А. Дубов, Е. Г. Ульянов // ДАН СССР. – 1975. – Т. 224. - № 6. – С. 1312 – 1314.

4. McClure J. P. Plasma bubbles and irregularities in the equatorial ionosphere / J. P. McClure, W. B. Hanson, J. H. Hoffman // J. Geophys. Res. – 1977. – Vol. 82. - № A4. – P. 2650 – 2658.

5. Fejer. B. O. Ionospheric irregularities / B. O. Fejer, M. C. Kelley // Revs. Geophys. And Space Phys. – 1980. – Vol. 18. - № 2. – P. 401 – 454.

6. Ерохин Н. С. Резонансное возбуждение внутренними гравитационными волнами рэлей-тейлоровских ионосферных пузырей в ночной экваториальной

Ф-области / Н. С. Ерохин, Н. М. Кащенко, С. П. Кшевецкий // Препринт ИКИ 1584. – 1989. – С. 15.

7. Гайдуков В. Ю. Запуск экваториальных пузырей путем модификации Е-слоя / В. Ю. Гайдуков, Н. М. Кащенко, С. В. Мацевский // Геомагнетизм и аэрономия. – 1991. – Т. 31. - № 6. – С. 1042 – 1048.

8. Иванов В. Б. Радиодиагностика низкоширотной ионосферы в эксперименте “Экваториальный триггер” / В. Б. Иванов, С. А. Намазов, Ю. А. Романовский // Иркутск: Издательство Иркутского университета. - Радиофизика и электроника: проблемы науки и обучения. - 1995. - С. 119 - 127.

9. Ким В. Ю. Решение обратной задачи многочастотного доплеровского зондирования искусственных возмущений ионосферы с помощью инверсии Абеля и сглаживающих сплайнов / В. Ю. Ким, В. А. Панченко // Препринт АН СССР. - № 52 (806). - М.: ИЗМИРАН. - 1988. - 25 с.

10. Ким В. Ю. Решение обратной задачи многочастотного доплеровского зондирования искусственных возмущений ионосферы с помощью инверсии Абеля и сглаживающих сплайнов / В. Ю. Ким, В. А. Панченко // Взаимодействие радиоволн с ионосферой. – М.: Наука. – 1990. – с. 71 – 83.

11. Иванов В. Б. Многочастотная диагностика ионосферы: методика и численный эксперимент / В. Б. Иванов, А. Н. Лапшин // Иркутск: Издательство Иркутского университета. - Радиофизика и электроника: проблемы науки и обучения. - 1995. - С. 114 - 119.

12. Генкин Л. Г. К вопросу об образовании и всплывании неизотермических ионосферных и хромосферных «пузырей» / Л. Г. Генкин, Л. М. Ерухимов, Е. Н. Мясников, М. М. Шварц // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 1987. – Т. 30. - № 5. – с. 567 – 577.

13. Гайдуков В. Ю. Трехмерная численная модель ионного облака в ионосфере / В. Ю. Гайдуков, Т. Н. Лебедева, Д. С. Фаермарк, А. В. Цема // Космические исследования. – 1993. – Т. 31. – вып. 1. – С. 101 – 107.