

На правах рукописи

**Филиппов Михаил Юрьевич**

**АМПЛИТУДНЫЙ ФАКТОР ИОНОГРАММЫ  
ВЕРТИКАЛЬНОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ  
ЦИФРОВОГО ИОНОЗОНДА**

Специальность 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова», сокращенное название ФГБУ «ИПГ».

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук, профессор

**Данилкин Николай Петрович**

**Официальные оппоненты:**

**Захаров Виктор Иванович**, кандидат физико-математических наук, доцент, ФГБОУ УВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», доцент кафедры физики атмосферы.

**Чернов Юрий Андреевич**, доктор технических наук, ФГУП Научно-исследовательский институт радио (НИИР), научный консультант.

**Ведущая организация:**

ФГУН «Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук».

Защита состоится 14 июня 2017 г. в 14<sup>00</sup> час. на заседании диссертационного совета Д 327.008.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова» по адресу: 129128, г. Москва, ул. Ростокинская, 9, ФГБУ «ИПГ», ауд. 512.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУ «ИПГ» адресу: 129128, г. Москва, ул. Ростокинская, 9, ФГБУ «ИПГ», и на сайте <http://ipg.geospace.ru/dissertation-council/>

Автореферат разослан «    »    \_    2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 327.008.01,

кандидат физико-математических наук,

Е.Н.

Хотенко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

### Формулировка проблемы и её актуальность

Одной из актуальных проблем физики атмосферы является исследование плазмы верхних слоев атмосферы (ионосферы), которое играет важную роль как для солнечно-земной физики, так и для изучения процессов распространения радиоволн сквозь неё. Исследования и диагностика состояния ионосферы производятся традиционно ионозондами, которые осуществляют измерения методом вертикального зондирования (ВЗ). Начиная с 40-х годов прошлого столетия традиционно ВЗ сопровождалось измерениями поглощения радиоволн методом А1. Однако, в последние десятилетия измерения поглощения радиоволн были прекращены практически на всех обсерваториях РФ.

Поглощение радиоволн ( $L$ ) – считается вторым по значимости параметром ионосферного радиоканала. Оно определяет потери энергии электромагнитной волны при движении сквозь ионосферу. На основе измерений поглощения радиоволн были впервые зарегистрированы и описаны многие (широтные, долготные, сезонные, вспышечные) эффекты ионизации нижней части ионосферы (области D). Также они позволили впервые экспериментально определить эффективные частоты соударений электронов в нижней ионосфере. Привлечение величины ионосферного поглощения в D-области, определяемого по отражениям от слоя E, позволяет оптимально выбирать параметры модельного вертикального профиля электронной концентрации ( $N_h$ -профиля) в D - области, что было многократно подтверждено при сопоставлении с ракетными измерениями  $N_h$ -профилей. Сопоставления были проведены с зондовыми измерениями на малых геофизических ракетах и с данными высокоточных измерений методом дисперсионного интерферометра на больших геофизических ракетах. Также, было показано, что при определении  $N_h$ -профиля на основе данных ионограммы ВЗ традиционным способом обращения ВЧХ,

использование дополнительной информации в виде данных поглощения радиоволн в D-области, позволяет приблизить вычисленный  $N_h$ -профиль к реальной высотной зависимости электронной плотности ионосферы. Всё это показывает, что целесообразно вернуть измерения поглощения радиоволн с учетом современных достижений в цикл стандартных измерений на ионосферной обсерватории.

Развиваясь, метод усреднения амплитуд во временной области для ускорения регистрации величины поглощения, успешно дополнялся усреднением в частотной области, что в современных условиях открывает возможности многочастотных измерений поглощения, используя многочастотные локаторы ионосферы – ионозонды. В последнее время была модернизирована государственная ионосферная сеть Росгидромета, а в качестве основного среднеширотного ионозонда выбран ионозонд «Парус-А».

В диссертации предлагается ввести новый параметр ионограммы - амплитудный фактор - который должен заменить поглощение радиоволн в задачах по распространению ионосферных радиоволн. Амплитудный фактор (АФ) – арифметическое среднее величины ионосферного поглощения КВ радиоволн, определяемое в частотном диапазоне принадлежащему одному ионосферному слою по данным амплитудно-высотно-частотной характеристики (АВЧХ) вертикального зондирования.

**Цель работы** – исследование ионосферного поглощения (амплитудного фактора) на основе регулярных измерений ионозонда вертикального радиозондирования в среднеширотном регионе.

Для достижения поставленной в работе цели необходимо было **решить следующие основные задачи:**

1. Произвести анализ существующих методов расчета ионосферного поглощения КВ и анализ возможностей ионозонда «Парус-А».
2. Сформулировать критерии верификации метода расчета амплитудного фактора на основе анализа вариаций ионосферного поглощения радиоволн.
3. Разработать программное обеспечение предварительной обработки данных цифровых ионограмм.
4. Разработать метод расчета поглощения (амплитудного фактора) по данным одной ионограммы вертикального зондирования.
5. Провести цикл измерений оценки амплитудного фактора за весь существующий период измерений.
6. Проанализировать вариации амплитудного фактора в зависимости от различных гелиогеофизических параметров.
7. Разработать метод расчета профиля электронной концентрации в D– области по данным амплитудного фактора и ВЧХ одной ионограммы ВЗ.

**Объект исследования**

Ионосферное поглощение КВ радиоволн.

**Предмет исследования**

Амплитудный фактор ионограммы ВЗ

**Методология и теоретическая основа**

Теоретической основой исследования стали монографии по ионосферному распространению радиоволн Я. Л. Альперта, К. Дэвиса, Г. Байнона, Дж. А. Ратклифа, Ф. Б. Черного и др., работы К. Равера, Ю. Н. Черкашина, М. Д. Флигеля, Г. В. Гивишвили, по методам определения ионосферного поглощения КВ радиоволн, работы А. Митра, А. В. Данилова по вариациям ионосферного поглощения радиоволн, работы Д. Титериджа, Н.П. Данилкина, П.Ф. Денисенко, В. В. Соцкого,

О. Е. Мальцевой по расчетам зависимости электронной концентрации ионосферы от высоты по данным ВЗ.

Решение задач осуществлялось с использованием апробированных методов теории распространения радиоволн в ионосфере, методов вычислительной математики, математической статистики, цифровой обработки сигналов.

### **Информационная база**

В работе использовалась база данных ВЗ государственной наблюдательной сети, базы данных индексов геомагнитной активности, солнечной активности, потока рентгеновского излучения Солнца спутника GOES.

### **Научная новизна**

1. Создан новый метод оценки величины ионосферного поглощения радиоволн по данным одной ионограммы ВЗ, с использованием усреднения величины поглощения в частотной области, – метод амплитудного фактора.
2. Впервые построен профиль электронной концентрации нижней ионосферы, опираясь на данные поглощения определенные методом амплитудного фактора из ионограммы ВЗ, и ВЧХ этой ионограммы.
3. Представлены данные ионосферного поглощения радиоволн московской ионосферной станции (с 1.6.2011 по 1.10.2016) и станции Ростов-на-Дону с 1.01.2014 по 1.10.2016 и показана преемственность этих данных на основе анализа литературных источников.
4. Введен новый параметр ионограммы вертикального радиозондирования цифрового ионозонда – Амплитудный фактор (АФ) – арифметическое среднее величины ионосферного поглощения КВ радиоволн, определяемое в частотном диапазоне принадлежащим одному ионосферному слою по данным амплитудно-высотно-частотной характеристики вертикального зондирования.

## **Научная и практическая значимость**

Результаты работы являются вкладом в развитие диагностических возможностей современного ионозонда. Разработан метод оперативного контроля поглощения радиоволн без изменения режима работы ионозонда. Разработанные программы могут использоваться для определения поглощения радиоволн в режиме, близком к реальному времени.

## **Положения, выносимые на защиту:**

1. Новый параметр ионограммы вертикального зондирования – амплитудный фактор.
2. Метод оценки поглощения (метод амплитудного фактора), использующий усреднение величин поглощения в частотной области, по данным одной ионограммы ВЗ.
3. База данных величины поглощения по всем имеющимся данным ВЗ цифрового ионозонда «Парус-А» московской ионосферной станции (с 1.6.2011 по 1.10.2016) и станции Ростов-на-Дону с 1.01.2014 по 1.10.2016.
4. Метод построения  $N_h$ -профиля в D-области по данным оценки поглощения, полученным из одной ионограммы ВЗ, и ВЧХ ионосферы.

## **Апробация работы.**

Результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: Конференция молодых специалистов Росгидромета, ФГБУ "ИПГ", Москва, 2012; Байкальская школа фундаментальной физики «БШФФ 2013»; на международных конференциях «Излучение и рассеяние электромагнитных волн «ИРЭМВ» ЮФУ в 2013 и 2015 годах, Научной ассамблее Международного комитета по исследованию космического пространства (COSPAR/КОСПАР), Москва, 2014, конференциях "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" в 2014, 2015,

2016 годах, Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн», Томск, 2016, конференции "Физика плазмы в солнечной системе", Москва, 2017, и семинаре «Внедрение автоматизированных средств измерений», Владивосток, 2015, на семинарах Института прикладной геофизики.

Результаты работы вошли в отчеты по ЦНТП Росгидромета (тема п.1.6.2 за 2013-2015гг).

**Личный вклад автора.** Результаты по теме диссертации получены лично автором или при его непосредственном участии. Автором предложен, разработан и реализован на языке Matlab алгоритм и метод амплитудного фактора расчета поглощения радиоволн; разработан и реализован на языке Matlab алгоритм и метод расчета профиля электронной концентрации в D-области по данным ВЗ и АФ, также автором лично произведены расчеты поглощения по данным ВЗ московской ионосферной станции в период с 1.6.2011 по 1.10.2016 и станции расположенной в г. Ростов-на-Дону, с 1.01.2014 по 1.10.2016.

### **Публикации**

Результаты диссертации опубликованы в 6 научных работах, из них 2 работы из списка ВАК «Известия Вузов. Физика», «Геомагнетизм и Аэрномия», опубликовано 9 тезисов докладов в трудах и сборниках докладов международных и российских научных конференций. Автором диссертации получено свидетельство (Роспатент) о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016610413 «Параметризованный Nh-профиль D-области ионосферы» от 12 января 2016.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из 5 глав, введения, заключения и списка литературы, включающего xxx наименований. Общий объем диссертации xxx страниц,



включая xxx рисунка и xxx страниц списка литературы из xxx наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность исследования, обозначены цели и задачи работы, сформулированы научная новизна и научно-практическая ценность работы. Перечислены основные научные положения, выносимые на защиту. Приводится краткое содержание работы.

**Первая глава** содержит обзор метода А1 измерения поглощения радиоволн по данным отражений ионосферы КВ радиоволн, представлены основные результаты применения метода и аргументируется необходимость видоизменения метода. Приведены основные допущения, поднимается проблема ускорения получения результата метода А1 и рассматриваются использованные ранее методы её решения.

**Основным выводом первой главы** является возможность создания метода расчета поглощения радиоволн, реализующего усреднение ионосферного поглощения радиоволн в частотной области.

**Вторая глава** посвящена формулированию требований к аппаратуре, а также формулированию требований к методу расчета поглощения радиоволн по данным ВЗ, с точки зрения практики дальнейшего применения метода на государственной наблюдательной сети Росгидромета.

Рассмотрен ионозонд «Парус-А», основной среднеширотный ионозонд ионосферной наблюдательной сети Росгидромета, на предмет возможности использования для анализа ионосферного поглощения КВ радиоволн. Пиковая мощность усилителя передатчика ионозонда «Парус-А» составляет 10 кВт, что сравнимо с мощностями установок реализующих метод А1, а высокая чувствительность обеспечивается

малощумящим предварительным усилителем с регулируемым коэффициентом усиления и восьмиразрядным АЦП. Таким образом, процесс регистрации амплитуд отражений ионосферы не содержит нелинейных преобразований. Производится решающий эксперимент по регистрации суточной вариации поглощения радиоволн.

**Основной вывод главы 2** заключается в том, что положительный результат эксперимента по усреднению амплитуд в частотном диапазоне, и соответствие ионозонда «Парус-А» требованиям к аппаратуре измерения поглощения, позволяют использовать рассматриваемый ионозонд в качестве инструмента для исследования ионосферного поглощения.

**Третья глава** посвящена формулированию процедуры верификации метода расчета ионосферного поглощения по данным ионозонда ВЗ «Парус-А» на основе анализа известных вариаций ионосферного поглощения радиоволн по данным метода А1.

Приводятся описание периодических вариаций поглощения, обусловленных геометрией падения солнечного излучения, а также периодическими изменениями параметров солнечного излучения. Рассмотрены литературные примеры суточных, сезонных, вариаций поглощения радиоволн. Описаны непериодические вариации ионосферного поглощения КВ, обусловленные солнечными вспышками. Для качественной и количественной оценки разрабатываемого метода расчета ионосферного поглощения предлагается использовать сравнение с параметром  $f_{min}$ , индикатором вспышечного поглощения радиоволн, определяемым при регистрации ионограмм. Описано явление Зимней аномалии (ЗА) поглощения, обусловленной изменениями в параметрах нейтральной компоненты. Анализируется описанная в литературе возможность восстановления профиля электронной концентрации в D области, на частотах ниже  $f_{min}$  по данным ионограммы ВЗ и

дополнительного параметра, которым может являться ионосферное поглощение радиоволн.

**Основным результатом главы 3** являются сформулированные критерии верификации метода расчета ионосферного поглощения по данным ионозонда ВЗ, которые заключаются в повторении всех известных из литературных источников вариаций поглощения во вновь регистрируемых данных.

**Четвертая глава** посвящена разработке метода расчета поглощения по данным ионозонда «Парус-А».

Метод подразумевает ряд допущений:

1. Поле в точке приема есть суперпозиция поля зеркальной и флуктуирующей компонент.
2. Флуктуации вызваны явлениями фокусировки/дефокусировки на неоднородностях в области отражения.
3. Неоднородности распределены равномерно по высоте на высотах отражения слоя E.
4. Неоднородности нормально распределены по величине  $dN/N$ .

Постоянная аппаратуры определяет уровень мощности зондирующей волны, учитывая падение амплитуды на единице действующей дальности из-за сферичности фронта волны:

$$G_0 = R_1 + 20 \ln(h') - L,$$

где  $h'$  – действующая дальность,  $R_1$  – амплитуда отраженного ионосферой сигнала в дБ.

$G_0$  определяется как исторический максимум этого выражения, предполагается, что он достигается в периоды минимального ионосферного поглощения  $L \sim 0$ . Тогда для каждой частоты  $f$ , в любой момент поглощение можно определить:

$$L(f) = L_n(f) + L_o(f) = G_0(f) - R_1(f) - 20 \ln(h'(f)),$$

где  $L_n$  - ионосферное (отклоняющее и неотклоняющее) поглощение,  $L_o$  - быстро флуктуирующее из-за эффектов фокусировки/дефокусировки.

$L_n(f)$  в частотном диапазоне одного ионосферного слоя монотонная и гладкая функция, с известной ошибкой можно считать:  $\langle L_n(f) \rangle = L_n(\langle f \rangle)$ , где  $\langle \rangle$  – обозначение арифметического среднего.

$$\langle L(f) \rangle = \langle L_n(f) + L_o(f) \rangle = \langle G_0(f) - R_1(f) - 20 \ln(h'(f)) \rangle,$$

Ослабление в отклоняющей области, для диапазонов, далеких от критических частот определяется эффектами фокусировки/дефокусировки волны на неоднородностях. При увеличении числа отсчетов входящих в усреднение,  $\langle L_o(f) \rangle \rightarrow 0$ . Для выполнения этого потребуем, чтобы  $L(f)$  было нормально распределено.

### *Алгоритм расчета амплитудного фактора ионограммы ВЗ*

- 1) По данным одной ионограммы внутри частотного диапазона следа одного ионосферного слоя выделяем  $R_1(f)$ ,  $h'(f)$ . Рассчитывается ряд величин  $L(f)$  на каждой частоте.
- 2) Критерием Пирсона  $\chi^2$  с заданным уровнем значимости проверяется гипотеза о том, что закон распределения ряда нормальный. Предполагается, флуктуации этой величины, связанные с отклоняющим поглощением, нормально распределены.
- 3) В случае выполнения критерия  $\chi^2$  выполняется - получаем параметры распределения – среднее и дисперсию; иначе полагаем, что оценка амплитудного фактора по ионограмме невозможна.
- 4) Рассчитываем эквивалентную «рабочую» частоту  $f$ , как середину частотного диапазона ряда  $L(f)$ .

*Метод расчета вертикального профиля электронной концентрации нижней ионосферы (ниже  $f_{min}$ ) по данным ионограммы ВЗ и ионосферного поглощения радиоволн (амплитудного фактора этой же ионограммы ВЗ).*

Итерационный процесс построен на основе метода Нельдера-Мида поиска локального минимума функции невязки. Величину невязки определяет сумма квадратов расхождений расчетных и наблюдаемых (определенных по ионограмме ВЗ) величин поглощения и действующей дальности  $h'$ . Для этого высотный профиль электронной концентрации  $N(h)$  описывается аналитическим выражением с двумя параметрами.  $N_{60}$  – значение электронной концентрации на высоте 60 км,  $\alpha$  – коэффициент в степенной функции. Затем, используя барометрический профиль эффективных частот соударений  $\nu(h)$ , в приближении элементарной магнитоионной теории для случая отсутствия магнитного поля и геометрического выражения для коэффициента поглощения, получены выражения для расчетных величин. Аналитическое выражение для  $h'$ :

$$h'_{\text{расч}}(N_{60}, \alpha) = \frac{1}{\alpha} \ln \left( \frac{\mu(h)-1}{\mu(h)+1} \right) \Big|_{h_0}^{h_{\varepsilon=0}},$$

где  $\mu$  – коэффициент преломления,  $h_{\varepsilon=0}$  – истинная высота отражения,  $h_0$  – начало высотного отсчета (60 км).

Поглощение считаем численно:

$$L_{\text{расчет}}(N_{60}, \alpha) = 2 \frac{\omega}{c} \frac{4\pi e^2}{2n\omega} \cdot \frac{h_{\varepsilon=0} - h_0}{n} \left\{ \frac{J(h_0) + J(h_{\varepsilon=0})}{2} + \sum_{h_0=1}^{h_{\varepsilon=0}-1} J(h) \right\},$$

где  $J(h) = \frac{N(h)\nu(h)}{\mu(h)(\omega^2 + \nu(h)^2)}$ .

Для нахождения оптимальных параметров, будем минимизировать выражение:

$$\Delta(N_{60}, \alpha) = (h'_{расчет} - h'_{f_{раб}})^2 + (L_{расчет} - L_{АФ})^2$$

Алгоритм Нельдера-Мида позволяет определить локальный минимум. Покажем графически что найденный минимум невязки – глобальный. На рисунке 1 представлена зависимость суммы квадратов невязки от параметров  $N_{60}$  и  $\alpha$ , видно что найденный минимум единственен.

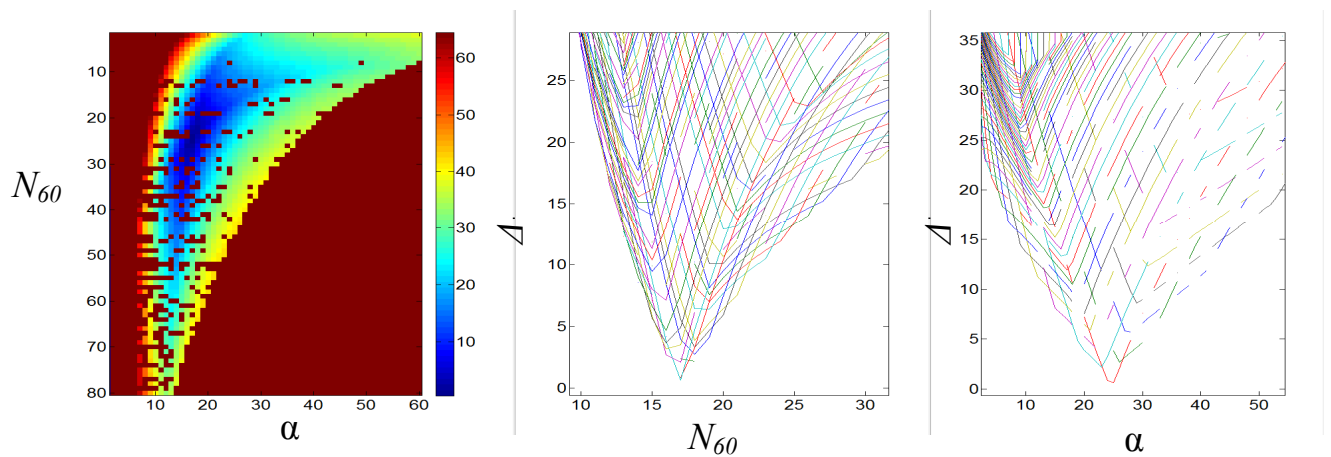


Рис. 1. В координатах параметров  $N_{60}$  и  $\alpha$  представлена величина суммы квадратов невязки (справа), а также проекции (по центру и слева).

**Выводы по главе 4:** разработаны метод и алгоритм расчета ионосферного поглощения по данным одной ионограммы ВЗ, метод и алгоритм расчета профиля электронной концентрации D- области по данным поглощения и одной ионограммы ВЗ. Указанные алгоритмы реализованы в программном коде.

**Пятая глава** посвящена описанию практического применения метода расчета ионосферного поглощения радиоволн и на основе статистического анализа существенного (5 лет измерений, или более 175 000 ионограмм) объема входных данных, выявлению закономерностей вариаций величины ионосферного поглощения радиоволн, верификации алгоритма расчета

амплитудного фактора на основе соответствия сопоставления наблюдаемых и описанных в литературе вариаций ионосферного поглощения радиоволн.

С течением времени эквивалентная рабочая частота, на которой измеряется амплитудный фактор, изменяется поэтому для анализа вариаций все значения приводятся к одной фиксированной частоте. На рисунке 2 показаны типичные суточные вариации поглощения.

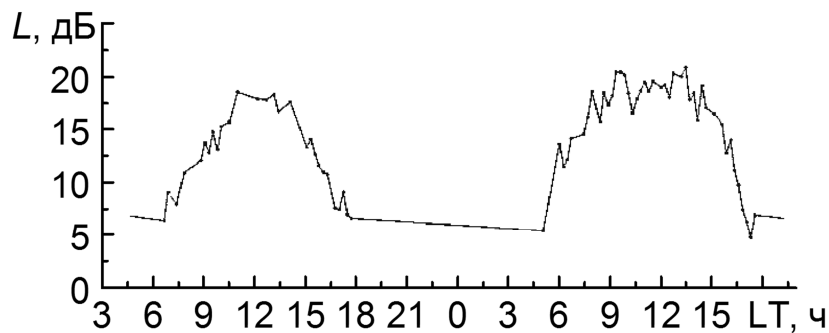


Рис. 2. Пример суточных вариаций поглощения радиоволн по данным амплитудного фактора приведенного к частоте 2,5МГц. По оси абсцисс местное время.

Рассмотрена вспышка 22 апреля 2013 года в 13:30LT (рис. 3). Выбрана эта вспышка, т.к. ей предшествовал более чем трехдневный геомагнитно-спокойный период ( $K_p < 3$ ). Вспышка вызвала увеличение  $f_{min}$  на 1.3 МГц (до значения 2.6 МГц) и поглощения на 10,7 дБ (до значения 24,5 дБ) над среднемесячными.

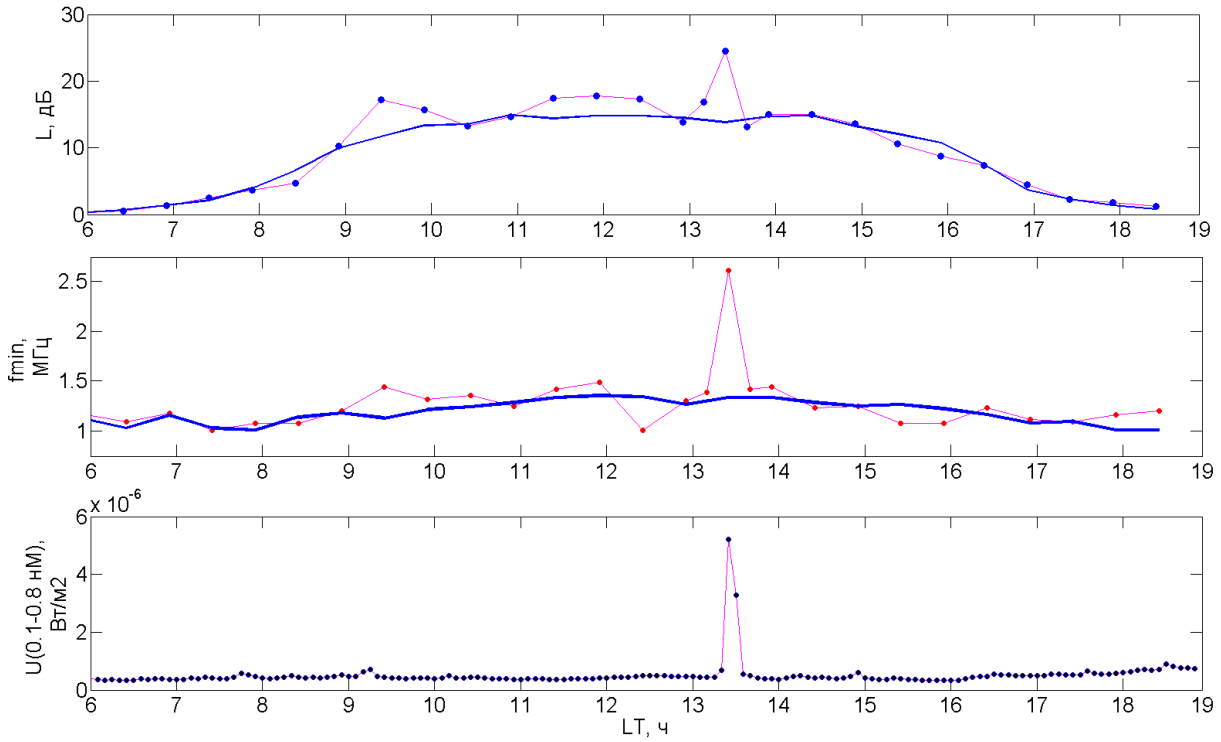


Рис. 3. Пример воздействия вспышки рентгена 22 апреля 2013 года в 13:30LT. Точками обозначены наблюдаемые значения, сплошные линии – среднемесячные.

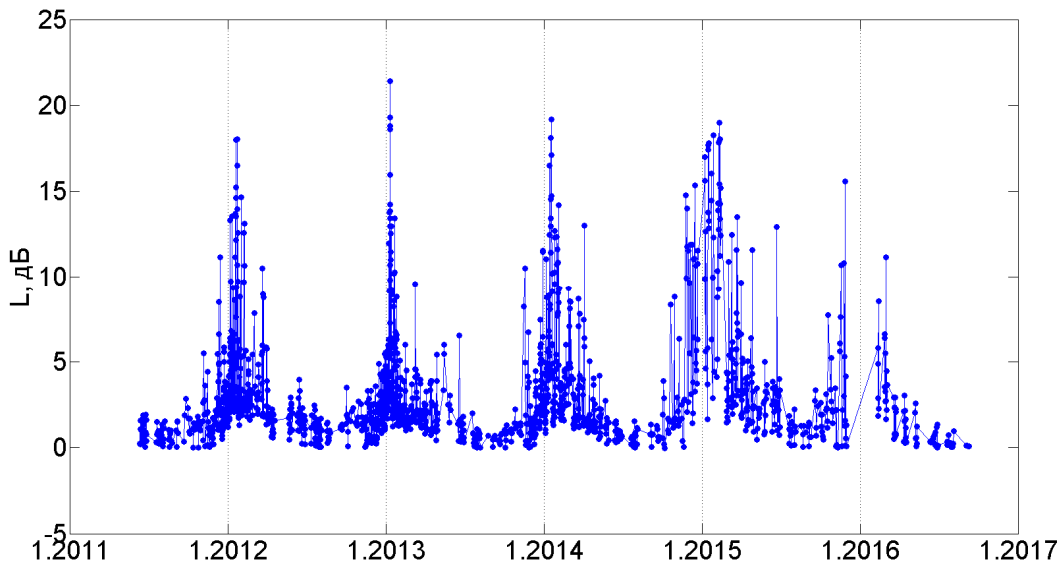


Рис. 4. Сезонные вариации поглощения, зарегистрированные в период с 2011 по 2016 года определенное при значениях зенитного угла Солнца в диапазоне от 81 до 79 градусов.



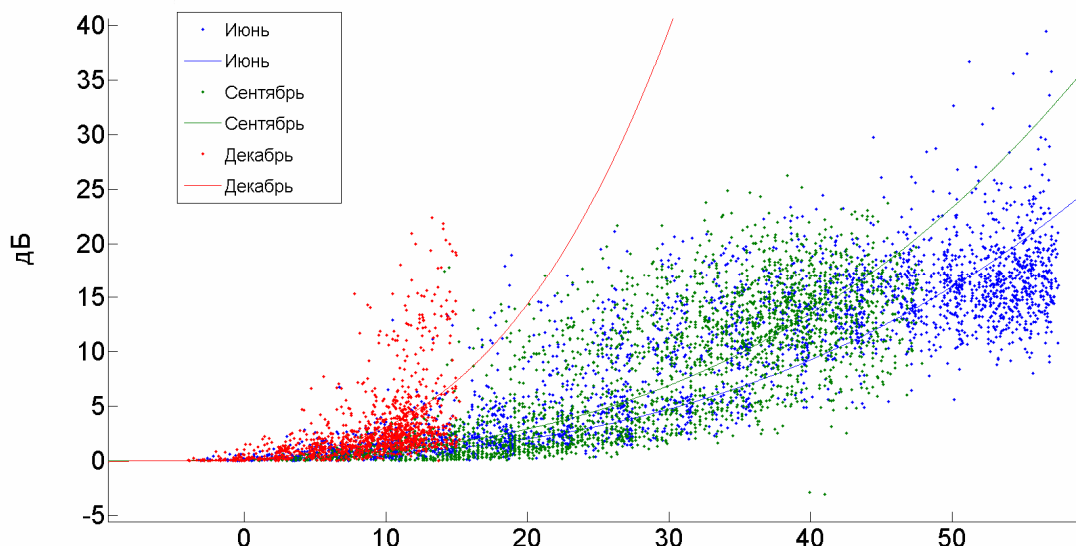


Рис. 5. По оси абсцисс угол возвышения солнца, по оси ординат поглощение за период с 2011 по 2016. Точки – данные соответствующих месяцев, линии – результаты регрессионного анализа.

На рисунке 4 заметно превышение значений поглощения в зимние месяцы над остальными сезонами, так называемая Зимняя аномалия (ЗА). Для численного описания эффекта ЗА в координатах поглощение – угол возвышения Солнца были выбраны данные трех характерных месяцев (Июнь и сентябрь – нет ЗА, декабрь – есть ЗА), и описаны полиномом третьей ( $n=3$ ) степени вида  $\alpha(x-b)^n$ . Результаты регрессионного анализа приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Месяц	Июнь	Сентябрь	Декабрь
$\alpha(\text{дБ/град}^{-3})$	$7.397 \cdot 10^{-5}$	$10.79 \cdot 10^{-5}$	$93.75 \cdot 10^{-5}$
$b$ (град)	-10	-10	-4.858
$R^2$ , квадрат смешанной корреляции	0.6228	0.6142	0.4806
Среднеквадратичная ошибка, дБ	4.5157	4.0200	1.9156
Кол-во измерений	3036	3036	3020

Из таблицы 1 следует, коэффициент  $\alpha$  летом-осенью изменяется незначительно, а в месяцы 3А увеличивается относительно осене-летнего значения на порядок величины.

Проведено сравнение данных поглощения, полученных методом амплитудного фактора, с модельными данными. В качестве такой модели была выбрана модель IRI 2012, с включенным блоком нижней ионосферы. Применяя к данным модели математический аппарат для расчета поглощения из профиля электронной концентрации и эффективной частоты соударений электронов, для локального полудня и фиксированной частоты 2.5 МГц построены значения поглощения радиоволн, представленные на рисунке 6.

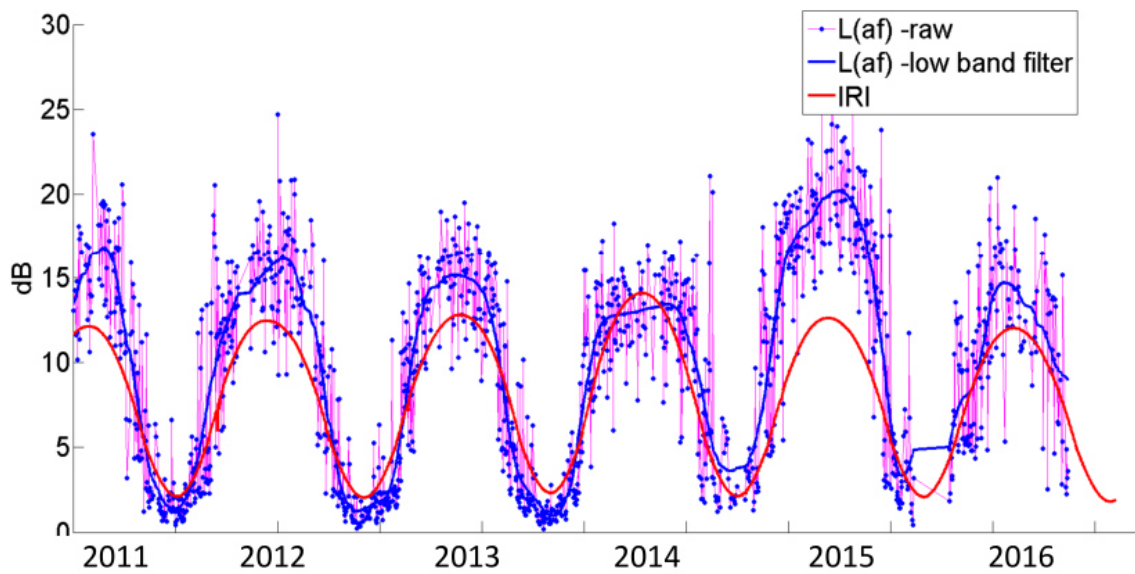


Рис. 6. Сравнение модельных (по IRI-2012) и наблюдаемых данных поглощения радиоволн на частоте 2.5 МГц московской ионосферной станции начиная с 1.06.2011 по октябрь 2016 года.

Заметно качественное и количественное совпадение результатов, исключая данные 2015 года (1300 – 1700 дни с начала измерений на московской станции). Вероятной причиной несоблюдения количественных оценок 2015 года стало временное изменение параметров АФК ионозонда.

## **Верификация разработанного метода расчета амплитудного фактора по результатам анализа рассчитанных вариаций**

В данных поглощения рассчитанных методом амплитудного фактора по московской ионосферной станции с 1.06.2011 по 1.10.2016 наблюдаются указанные в литературных источниках вариации, свойственные величине поглощения радиоволн, а именно:

- сезонные вариации с максимальными значениями летом;
- суточные вариации с максимумом в локальный полдень;
- ярко выраженная зависимость поглощения от зенитного угла Солнца в периоды без ЗА;
- зарегистрировано явление ЗА, получено качественное и количественное описание;
- зарегистрированы непериодические вариации, однозначно определенные как возмущения, вызванные вспышечными явлениями Солнца;
- качественное совпадение результатов модельных (IRI-2012) и наблюдаемых сезонных вариаций полуденных значений поглощения

**Основной вывод главы 5:** на основе данных московской ионосферной станции с 1.06.2011 по 1.10.2016 верифицирован метод расчета величины поглощения радиоволн.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ:**

1. Разработан, реализован в программном коде метод расчета ионосферного поглощения КВ по данным одной ионограммы ВЗ ионозонда «Парус-А».
2. Обработан значительный фактический материал, рассчитан амплитудный фактор ионограмм вертикального зондирования ионозонда «Парус-А», зарегистрированных с разделением магнитоионных компонент по принципу поляризации, с интервалом между соседними 15 минут, в

период с 1.6.2011 по 1.10.2016 по московской ионосферной станции и в период с 1.1.2014 по 1.10.2016 станции в г. Ростов-на-Дону. На основе этих данных получены качественно схожие с наблюдавшимся в предыдущие периоды вариации ионосферного поглощения радиоволн.

3. Получены количественные оценки эффекта Зимней аномалии. При фиксированном зенитном угле Солнца, величины поглощения в месяцы 3А на порядок превышают величины поглощения в другие месяцы.

4. Зарегистрированы неперiodические вариации, однозначно определенные как возмущения, вызванные вспышечными явлениями.

5. Разработан метод расчета профиля электронной концентрации в D-области по данным поглощения и ВЧХ одной ионограммы ВЗ.

#### Публикации по теме

1. Гивишвили Г.В., Данилкин Н.П. , **Филиппов М.Ю.** / Оценка ионосферного поглощения радиоволн по одной ионограмме вертикального зондирования // Геомагнетизм и Аэрoномия Т.56 №1 С.86-92, 2016 Doi:10.7868/S0016794016010065 (Список ВАК)
2. **Филиппов М.Ю.** Данилкин Н.П. Амплитудный фактор ионограммы вертикального зондирования как интегральная характеристика ионосферного слоя // Известия Вузов. Физика Т.59 №12-2, С 97-99, 2016 (Список ВАК)
3. **Филиппов М.Ю.** Апробация алгоритма оценки ионосферного поглощения радиоволн по ионограммам вертикального зондирования ионозонда «Парус-А»// Сб. «Излучение и рассеяние электромагнитных волн. ИРЭМВ.-2015» Таганрог-Дивноморское. С.579 -582. 2015
4. Данилкин Н.П. , **Филиппов М.Ю.** Методы извлечения дополнительной информации из ионограмм вертикального зондирования // Сб. тр. международной байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике и XIII конференции молодых ученых "Взаимодействие полей и излучения с веществом"

Секция В. Физика околоземного космического пространства.  
БШФФ-2013. С. 209–210

5. Гивишвили Г.В., Данилкин Н.П., **Филиппов М.Ю.** О возможности исследования поглощения радиоволн по ионограммам вертикального зондирования ионозонда «Парус-А»// Сб. «Излучение и рассеяние электромагнитных волн. ИРЭМВ.-2013» Таганрог-Дивноморское. С.579 -582. 2013
6. Данилкин Н.П., **Филиппов М.Ю.** Расчет высотного профиля электронной концентрации в D- области ионосферы по результатам вертикального зондирования с использованием данных поглощения и действующей высоты» // Тр. ИПГ им. Е.К.Федорова -М.; 2012, - Вып. 91, стр.89-92. Конференция молодых специалистов Росгидромета, ФГБУ "ИПГ" (г. Москва), 10-12 декабря 2012.

#### **Доклады на конференциях:**

1. Расчет высотного профиля электронной концентрации в D - области ионосферы по результатам вертикального зондирования с использованием данных поглощения и действующей высоты» - Конференция молодых специалистов Росгидромета, ФГБУ "ИПГ", Москва, 10-12 декабря 2012 г.
2. О возможности исследования поглощения радиоволн по ионограммам вертикального зондирования ионозонда «Парус-А»// «Излучение и рассеяние электромагнитных волн. ИРЭМВ.-2013» Таганрог-Дивноморское. 2013 г.
3. Методы извлечения дополнительной информации из ионограмм вертикального зондирования // XIII конференция молодых ученых "Взаимодействие полей и излучения с веществом" БШФФ-2013 Иркутск
4. Evaluation of ionospheric radio waves absorption based on one ionogram of vertical sounding ionosonde // COSPAR 2014 Moscow. 2-10 august 2014
5. Ионосферное поглощение радиоволн, отражающихся от различных слоёв ионосферы, по данным ионограммы вертикального зондирования. "Современные проблемы дистанционного

- зондирования Земли из космоса", Москва, ИКИ РАН 10-14 ноября 2014 г.
6. Апробация алгоритма оценки ионосферного поглощения радиоволн по ионограммам вертикального зондирования ионозонда «Парус-А»/// Сб. «Излучение и рассеяние электромагнитных волн. ИРЭМВ.-2015» Таганрог-Дивноморское.
  7. Опыт использования ионозонда «Парус-А» как автоматизированного средства ионосферных измерений, семинар «Внедрение автоматизированных средств измерений», Приморское УГМС, Владивосток, 2015 г.
  8. Амплитудный фактор как дополнительный параметр ионограммы вертикального зондирования. "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", Москва, ИКИ РАН 10-14 ноября 2015 г.
  9. Амплитудный фактор ионограммы вертикального зондирования как интегральная характеристика ионосферного слоя. XXV Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», Томск, 4–9 июля 2016 г.
  10. Вариации ионосферного поглощения радиоволн в 2011–2016 годах по данным московской ионосферной станции. "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", Москва, ИКИ РАН 14-18 ноября 2016 г.
  11. Разномасштабные вариации ионосферного поглощения радиоволн КВ-диапазона по данным ионозонда ВЗ. "Физика плазмы в солнечной системе", Москва, ИКИ РАН 6 -10 февраля 2017 г.