

Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации
Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
Федеральное государственное бюджетное учреждение
Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

На правах рукописи

Филиппов Михаил Юрьевич

**АМПЛИТУДНЫЙ ФАКТОР ИОНОГРАММЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО
РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ЦИФРОВОГО ИОНОЗОНДА**

Специальность 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

научный руководитель

доктор физ.-мат. наук, профессор

Н.П. Данилкин

Москва – 2017

Оглавление

Введение	4
1. Некоторые вопросы теории ионосферного поглощения радиоволн	18
1.1 Импульсный метод А1	20
1.2 Расчет ионосферного поглощения и частотная зависимость поглощения	22
1.3 Проблема усреднения.....	27
1.4 Подходы к восстановлению профиля электронной концентрации в нижней ионосфере по данным ВЗ.....	30
Выводы по главе 1	31
2 Аппаратура исследования	32
2.1 Требования к аппаратуре	32
2.2 Ионозонд «Парус –А»	33
2.3 Московская ионосферная станция в ИЗМИРАНе.....	34
2.4 Решающий эксперимент о возможности расчета поглощения	36
Выводы по главе 2.....	39
3 Сведения по вариациям поглощения	40
3.1 Периодические вариации поглощения, обусловленные геометрией солнечного излучения (суточно-сезонные) и солнечной активностью.....	41
3.2 Непериодические вариации – следствия солнечных вспышек.....	42
3.3 Среднеширотная Зимняя аномалия поглощения радиоволн	44
3.4 Несимметричность суточного хода поглощения	47
3.5 Возможности сетевого ионозонда для наблюдения вариаций поглощения	49
3.6 Критерии работоспособности метода, на основе наблюдения вариаций поглощения	50
Выводы по главе 3	51
4 Метод расчета поглощения по данным ионозонда «Парус-А».....	52
4.1 Амплитудный фактор. Усреднение по частоте величины поглощения и усреднение по времени амплитуд отраженных ионосферой КВ радиоволн.	52
4.2 Алгоритм расчета поглощения методом амплитудного фактора.....	55
4.3 Алгоритм перехода к фиксированной частоте	63

4.4	Метод расчета профиля электронной концентрации по данным одной ионограммы ВЗ.....	64
4.5	Алгоритм расчета профиля электронной концентрации по данным одной ионограммы ВЗ до f_oE	66
	Выводы по главе 4.....	68
5	Вариации поглощения по данным ионозонда «Парус-А».....	69
5.1	Практика работы с результатами метода АФ	69
5.2	Данные московской ионосферной станции (ИЗМИРАН).....	74
5.3	Данные ионосферной станции Ростов-на-Дону	75
5.4	Суточные вариации поглощения радиоволн	76
5.5	Асимметрия суточного хода поглощения.....	77
5.6	Солнечные вспышки	81
5.7	Регрессионные уравнения для интегральной солнечной активности.....	83
5.8	Среднеширотная зимняя аномалия поглощения.....	84
5.9	Проверка через решение прямой задачи для простого случая: сезонный ход поглощения по N_h профилям IRI	89
5.11	Применение метода АФ к отражениям различных ионосферных слоёв.....	95
5.12	Верификация разработанного метода расчета амплитудного фактора по результатам анализа вариаций поглощения	96
5.13	Использование ионограмм других ионозондов	97
	Выводы по главе 5.....	98
	Заключение	100
	Список используемой литературы	103
	Приложения	112

Введение

Одной из актуальных проблем физики атмосферы является исследование плазмы верхних слоев атмосферы (ионосферы), которое играет важную роль для солнечно-земной физики, а также для изучения процессов распространения радиоволн сквозь неё. Нижняя часть ионосферы – высоты от 60 до 90 км – D-слой является наименее изученной областью. Ограничения доставки на эти высоты измерителей электронной концентрации – спутниковых – высокая плотность нейтралов, ракетных – эпизодичность и дороговизна, делает возможным использование лишь удаленных методов контроля среды.

Традиционным методом исследования ионосферы является метод вертикального зондирования ионосферы в диапазоне плазменных частот (ВЗ) [17]. Он основан на эффекте плазменного резонанса, когда зондирующий импульс отражается достигая высоты, где точно выполняется равенство плазменной частоты среды и несущей частоты зондирования. Импульсы с несущей частотой больше плазменной, испытывая преломление, проходят выше, а с частотой ниже несущей быстро затухают. Таким образом, метод ВЗ наиболее информативен, если из точки с меньшей концентрацией производить зондирование области с постоянным положительным градиентом концентрации электронов. Отсюда следуют затруднения в исследовании D- слоя для метода внешнего зондирования ионосферы со спутников. Зондируя с поверхности Земли, получить отражения ионосферы D-области затруднительно в силу значительного поглощения в D-области на этих частотах и сложностей в построении АФК для генерации мощных радиоволн километрового диапазона, соответствующих плазменным. По результатам восстановления профилей электронной концентрации используя сигналы ГНСС область D разрешается плохо, в силу малой ионизации в сравнении с интегралом по электронному содержанию вдоль лучевой траектории [2] (ТЕК). Поэтому, для исследования D слоя, как правило используют

интегральные параметры. Таким параметром долгое время выступала величина поглощения радиоволн в ионосфере, определяемая при ВЗ по данным отражений от слоя E, называемое методом A1. Достоинством метода A1 является относительная простота получения результатов, широкая география и история измерений. В сравнении с другими экспериментальными методами исследования поглощения (A2, A3), результаты метода A1 относятся к меньшим высотным и пространственным областям, и поэтому, более информативны. Согласно уравнению Эплтона-Хартри [3, 37], частота зондирования близкая к плазменной, делает результаты A1 более чувствительными к изменению ионизации в сравнении с A2. Начиная с 40-х годов прошлого столетия традиционно ВЗ сопровождалось измерениями поглощения радиоволн методом A1 [36]. 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 распространении 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 [8,9, 20, 72,73]. Привлечение величины ионосферного поглощения в D-области, определяемого по отражениям от слоя E, позволяет оптимально выбирать параметры модельного вертикального профиля электронной концентрации (Nh-профиля) в D – области [58], что было многократно подтверждено при сопоставлении с ракетными измерениями Nh-профилей [20]. Сопоставления были проведены с зондовыми измерениями на малых геофизических ракетах и с данными высокоточных измерений методом дисперсионного интерферометра [49] на больших геофизических ракетах. Также, было показано, что при определении Nh-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 [32].

Развиваясь, метод усреднения амплитуд во временной области для ускорения регистрации величины поглощения, успешно дополнялся сначала усреднением в скользящем временном диапазоне [11,15], а потом и усреднением в частотной области [21], 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 работе [14] указывается на потенциальную возможность использования ионозонда «Парус-А» для оценки ионосферного поглощения. В самом деле, ионозонд «Парус-А» [14, 53] обладает мощным передатчиком и регистрирует амплитуды отраженных ионосферой сигналов на ионограммах ВЗ.

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 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. Д. Данилова, Э. И. Гинзбурга 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, 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. (приложение 1)

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из 5 глав, введения, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации 112 страниц, включая 40 рисунков, 9 страниц списка литературы из 86 наименований и 1 страницы приложения.

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 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 2 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.

Третья 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 малошумящим предварительным усилителем с регулируемым коэффициентом усиления и восьмиразрядным АЦП. Таким образом, процесс регистрации амплитуд отражений ионосферы не содержит нелинейных преобразований. Проводится эксперимент по оценке суточной вариации поглощения на основе усреднения амплитуд первого кратного отражения в частотном диапазоне слоя Е по данным 8 разнесенных по времени ионограмм.

Основной вывод главы 3 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.

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. Флуктуации вызваны явлениями фокусировки/дефокусировки на неоднородностях в области отражения.
2. Неоднородности на высотах отражения слоя E распределены равномерно по высоте, нормально распределены по величине dN/N .
3. Линейная зависимость неотклоняющего поглощения (в дБ) от частоты

Следствия допущений:

1. Логнормальное распределение величин поглощения в выборке по частотам, на это указывает Черкашин [21].
2. Флуктуирующая компонента имеет нулевое математическое ожидание в выборке по частотам.
3. Средняя величина поглощения соответствует средней частоте.

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

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

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 , поглощение можно определить:

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

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 (допущение 3): $\langle L_n(f) \rangle = L_n(\langle f \rangle)$, где $\langle \rangle$ – обозначение арифметического среднего.

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

Согласно следствиям допущений, $\langle L_o(f) \rangle \rightarrow 0$. Для выполнения этого, проверим гипотезу о нормальном распределении $L(f)$.

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 χ^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 χ^2 получаем параметры распределения среднее и дисперсию;
- 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, α – 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 μ – 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:

$$\Delta(N60, \alpha) = (h'_{расчет} - h'_{f_{раб}})^2 + (L_{расчет} - L_{АФ})^2$$

Алгоритм Нельдера-Мида позволяет определить локальный минимум. Графически показано, что найденный минимум невязки – глобальный.

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.

Проведена 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.

1. Некоторые вопросы теории ионосферного поглощения радиоволн

Вертикальное зондирование в диапазоне плазменных частот ионосферы является прецизионным методом исследования ионосферы, т.к. условие отражения радиоволн есть равенство плазменной частоты ионосферы и несущей частоты зондирующего импульса. Особыми зонами, недоступными для прямых измерений методом ВЗ являются области «ненаблюдаемой» ионизации, а именно D-область и «долина» пониженной ионизации между слоями E и F. [3, 35] Естественным ограничением метода «сверху» выступает главный максимум ионизации. Основным параметром вертикально стратифицированной ионосферы является зависимость электронной концентрации от высоты, или $N(h)$ – профиль. Задача построения профиля электронной концентрации в D-области имеет фундаментальное значение для метода ВЗ, т.к. при решении классической задачи обращения ВЧХ начало шкалы «истинных» высот отражения ионосферы является неопределенным, что может приводить к ошибкам определения всего $N(h)$ профиля.

Исследование области D и нижней части слоя E ионосферы с помощью ионозондов затруднено отсутствием на ионограммах отражений от этих областей, вследствие низкой электронной концентрации ионосферной плазмы на этих высотах, и связано с характерными значительными величинами поглощения радиоволн на частотах, соответствующих плазменным в указанных областях. Зондирование на таких частотах, также затруднено невысокой эффективностью работы антенно-фидерных комплексов (АФК) на километровых волнах [53]. Таким образом, дистанционный контроль D области может быть осуществлен по данным ионозонда используя интегральные параметры, которые определяются ионизацией в области $f_{nl} < f_{min}$.

В соответствии с международной классификацией [71], экспериментальная регистрация поглощения реализуется методами А1, А2, А3:

А1 – поглощение определяется регистрацией амплитуд (кратных отражений) при вертикальном зондировании на фиксированных частотах.

А2 – поглощение определяется вариациями амплитуд космических источников радиоизлучения на $f > 30$ МГц, используется не только для диагностики ионосферы [5, 65], но и для физики солнечно-земных связей, магнитосферных эффектов, распространен в полярных областях.

А3 – поглощение определяется при наклонном приеме фиксированных источников радиоизлучения, отраженных ионосферой.

Результаты А1 являются наиболее легко интерпретируемыми, т.к. зондирование может происходить на оптимальных для наблюдения КВ поглощения частотах (как будет показано ниже, 2-3 МГц), а по сравнению с А3 данные измерения могут быть отнесены к конкретной лучевой траектории, что вносит минимум неопределенности.

Отметим, что результаты различных методов определения поглощения радиоволн несут в себе особенности связи регистрируемых параметров с ионосферной характеристикой, и это необходимо учитывать при интерпретации конкретных изменений величин поглощения. Преобразование же величин одного метода в результаты другого представляет собой нетривиальную задачу, связанную с моделированием конкретных ионосферных процессов и распространением ионосферных радиоволн.

1.1 Импульсный метод А1

Заключается в сравнении усредненных по времени амплитуд одно- (r_1) и двукратно (r_2) отраженных от ионосферы радиоволн. Величина ионосферного поглощения L на какой-либо фиксированной частоте f определяется как:

$$L = -20 \lg(\rho) = -20 \lg\left(\frac{2r_2}{r_1}\right) = R_1 - R_2 - 20 \lg(2),$$

где r_1 , r_2 – амплитуды первого и второго кратных отражений соответственно; R_1 , R_2 – логарифмы амплитуд первого и второго кратных отражений соответственно (дБ); ρ – коэффициент отражения от ионосферы.

Действующая высота отражения первого кратного отражения считается в два раза меньше действующей высоты второго, что дает коэффициент 2 в выражении. Также полагается, что коэффициент отражения от земли полагается равным 1, т.е. вся энергия зондирующей радиоволны отражается от поверхности земли без потерь [71, 44]. Это, конечно же, не вполне соответствует действительности [11], однако не учет этого вносит аддитивную погрешность в измерения L , постоянную в течение длительных периодов, что делает возможным пренебречь ей в инженерных расчетах.

В дневные часы и на частотах, не превышающих критическую частоту слоя E – foE , величина поглощения обыкновенно столь велика, что удается регистрировать лишь однократно отраженный сигнал. В случае, когда двукратно отраженный сигнал регистрируется, частотные ряды амплитуд двукратных отражений существуют на значительно меньшем количестве частот и имеют большие флуктуации по сравнению с рядами амплитуд однократно отраженных сигналов из-за двукратного прохождения области отражения, где существуют случайные эффекты ослабления за счет фокусировки/дефокусировки, что также затрудняет использование усредненной амплитуды второго кратного отражения.

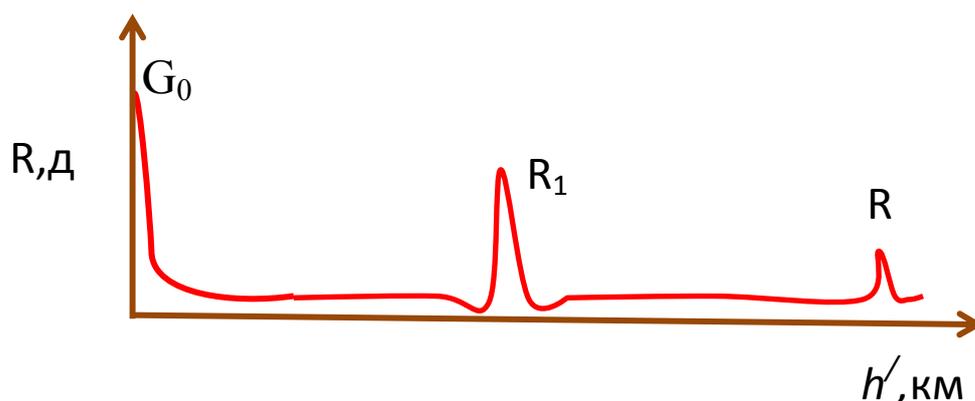


Рис. 1. К определению постоянной аппаратуры в отсутствие ионосферного поглощения.

В отсутствие надежных амплитудных данных второго кратного отражения для получения значения поглощения вводят калибровочную «постоянную аппаратуры» [52, 71], определяемую как логарифм произведения действующей дальности h' , регистрируемой амплитуды на фиксированной частоте:

$$G_0 = 20 \lg(r_1 h') = R_1 + 20 \lg(h') = \text{const} . \quad (1)$$

Постоянная аппаратуры характеризует уровень мощности зондирующей волны, учитывая падение амплитуды на единице действующей дальности из-за сферичности фронта волны, в отсутствие ионосферного поглощения. На практике используется либо исторический максимум этого выражения, рассчитываемый в периоды с малым поглощением, в периоды надежной регистрации двукратных отражений, используя выражение:

$$G_0 = 20 \lg\left(\frac{r_1 h'}{\rho}\right) = 20 \lg\left(\frac{r_1^2 h'}{2r_2}\right) = 2R_1 + 20 \lg(h') - R_2 - 20 \lg(2) .$$

Поглощение L получают из соотношения:

$$L = -20 \lg(\rho) = G_0 - R_1 - 20 \lg(h'). \quad (2)$$

Некоторые исследователи определяют величину постоянной аппаратуры используя амплитуду сигнала, измеренную в ночные часы, полагая что поглощение в это время незначительно. Однако, как показывают данные измерений, ночью величина ионосферного КВ поглощения может составлять единицы и даже десятки дБ [10].

1.2 Расчет ионосферного поглощения и частотная зависимость поглощения

Поглощение радиоволн в ионосфере является интегральной величиной различных локальных параметров распространения, которые определяются средой - ионосферой и нейтральной атмосферой. Основным механизмом ионосферного поглощения КВ - омические потери энергии радиоволны. При распространении сквозь ионизированную среду, эти потери определяются рассеянной энергией переизлучающих электронов, вследствие их соударений с другими частицами. Магнитоионная теория [30, 60] рассматривает этот процесс с позиций вероятности столкновений, учитывая возможные варианты столкновений типа электрон – нейтрал, электрон – ион, электрон – электрон. Учитывается переменный с высотой состав нейтральной атмосферы. Такой подход создает обобщенную характеристику среды – высотную зависимость эффективной частоты соударений электронов $\nu(h)$. Теоретические оценки эффективной частоты соударений хорошо сходятся с эмпирическими результатами до высот 120-130 км, и расходятся для более высоких слоев [8, 9, 10, 26].

Прямой расчет поглощения является хорошо исследованной задачей, способы решения можно разделить на методы конечных элементов и методы решения волновых уравнений. Первые [80] дают наиболее верный результат, т.к.

размер ячеек может уменьшаться сколь угодно, но при этом эти методы достаточно ресурсоёмкие, особенно при расчете больших величин поглощения. Вторые используют разбиение среды на относительно большие области, в которых действуют приближения для конкретных механизмов поглощения, что позволяет быстро получить результат. Они описаны в классической литературе, на основе разработаны методы [3, 31, 41, 67, 82], программные пакеты аналитического расчета ионосферного поглощения [55, 77], на основе данных моделей атмосферы (эффективных частот соударений электронов) [27, 73, 78] и ионосферы [56] (электронной концентрации), в том числе для D-области дополнительно [70, 62], хорошо себя зарекомендовавшие для долгосрочного планирования радиовещания [46, 59]. Однако, и обе группы решений не могут применяться для задач оперативного прогноза, из-за отсутствия надежных локальных моделей среды распространения и вследствие изменчивости ионосферы.

В классическом способе расчета поглощения, для дециметровых волн коэффициент отражения радиоволны от ионосферного слоя ρ и χ коэффициент поглощения волны в слое связаны между собой в приближении геометрической оптики соотношениями:

$$\rho = \exp \left\{ -2 \frac{\omega}{c} \int_{h_0}^{h_{\varepsilon=0}} \chi \partial h \right\}$$

Где, пренебрегая магнитным полем:

$$\chi = \frac{1}{2m_e \omega} \frac{4\pi e^2 N \nu}{\mu(\omega^2 + \nu^2)}$$

интеграл можно разделить по высотам:

$$L = -\lg \rho = \frac{2\pi e^2}{cm_e} \int_{h_0}^{h_1} \frac{N\nu}{\mu(\omega^2 + \nu^2)} \partial h + \int_{h_1}^{h_{\varepsilon=0}} \nu \left(\frac{1}{\mu} - \mu \right) \partial h$$

h_1 – условная высота, где перестает выполняться условие $\mu \ll 1$.

Первое слагаемое характеризует поглощение в неотклоняющей области, второе – поглощение так называемой, отклоняющей области, близкой точке отражения. В отклоняющей области величина ν меняется слабо, можно вынести за пределы второго интеграла среднее значение ν в отклоняющие области, а также ввести групповой и фазовый путь. Отметим, что для дневной ионосферы второй интеграл существенно меньше первого для диапазона (2-3 МГц), при отражении от резкого градиента слоя E, вдали от f_{oE} мало зависит от частоты.

На основании моделей простого слоя показано, что при экспоненциальном убывании эффективной частоты соударений с высотой и также экспоненциальном убывании коэффициента рекомбинации, частотная зависимость поглощения представляет собой:

$$L(\omega) = \frac{A \cos \gamma}{(\omega \pm \omega_L)^2},$$

где ω , ω_L – рабочая и гирорезонансная частота, γ - зенитный угол Солнца.

Эта форма хорошо описывает экспериментальные зависимости поглощения от частоты, и была уточнена для различных условий:

$$L = \frac{A (\cos \gamma)^p}{(\omega + \omega_L)^m},$$

где p , m , A являются параметрами, значения которых исследовались.

Исследованию частотной зависимости поглощения посвящен ряд работ [1, 11, 40, 54]. В [11, 54] исследуется параметр m , который варьируется в средних широтах в диапазоне $m=0,2 - 3$, с наиболее вероятными значениями $m=1,5-1,8$.

Таким образом, алгоритм пересчета величины поглощения к одной частоте представляется

$$L(2,5) = L(\omega) \left(\frac{\omega + \omega_L}{2,5 + \omega_L} \right)^m, \quad (3)$$

С другой стороны, для наглядности возможности усреднения приведем рис. 2, характеризующий высотную зависимость неотклоняющего поглощения (омических потерь) в координатах рабочей частоты и истинной высоты подынтегрального выражения $A(f)$, рассчитанный для экспоненциальной зависимости $N_e(h)$ и барометрической $\nu(h)$ [65].

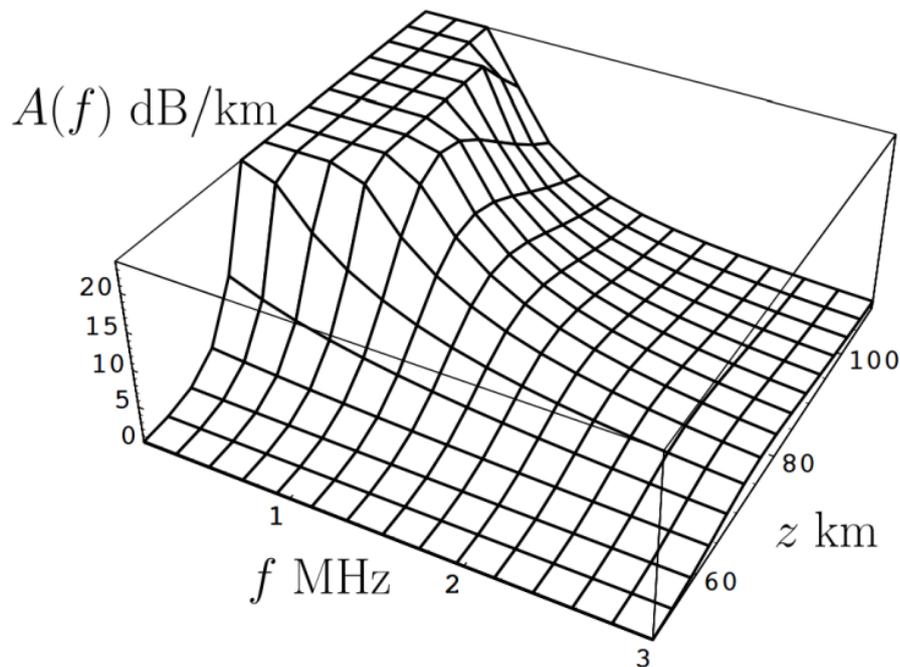


Рис. 2 Показатель поглощения как функция частоты и высоты. [65]

Суточные вариации поглощения были описаны и исследованы в первую очередь, как наиболее наглядные. Обратимся к экспериментальным данным поглощения (рис. 3), полученным на нескольких фиксированных частотах одновременно [10].

Для построения качественной картины суточного хода поглощения на всех частотах воспользуемся следующими соображениями: идеализируя данные рисунка 3, выделим монотонность уменьшения величины поглощения с увеличением частоты, а для описания зависимости поглощения от зенитного угла Солнца χ воспользуемся косинусоидальной моделью [3, 16].

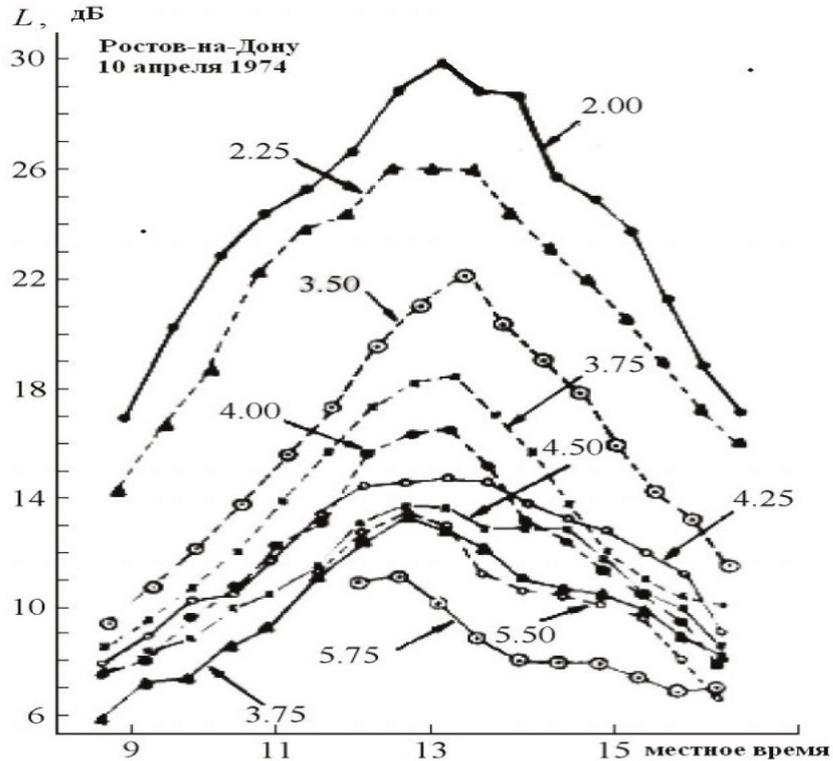


Рис. 3. Дневной ход поглощения радиоволн (о-компонента) на частотах от 2 МГц до 5.75 МГц. [10]

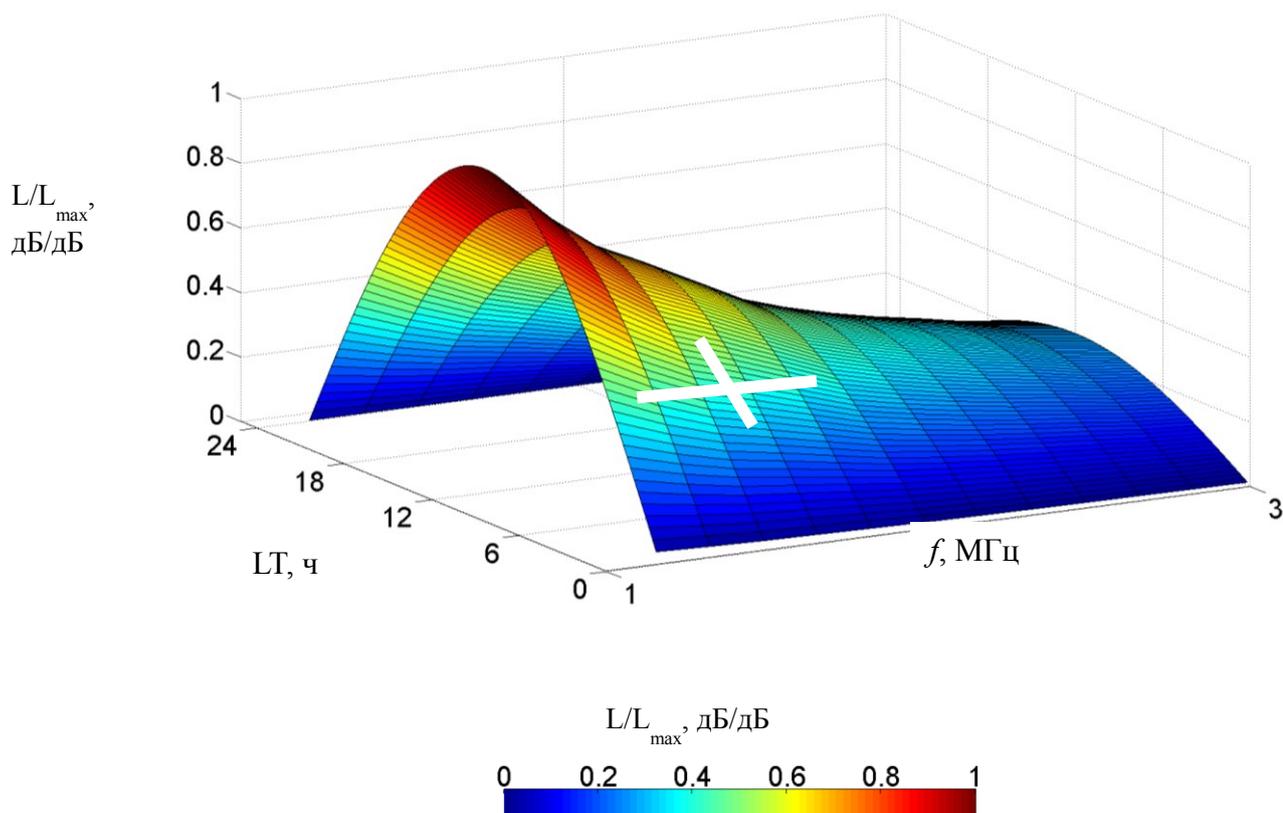


Рис. 4 Качественная картина суточного хода поглощения радиоволн на всех частотах, белые линии обозначают области усреднения: частотную и временную.

1.3 Проблема усреднения

Полное ослабление радиоканала земля – ионосфера – земля состоит из ослабления сферической волны (обратно пропорционально квадрату длины лучевой траектории) и ионосферного поглощения. Ионосферное поглощение радиоволн можно разделить по природе формирования ослабления на две части. Неотклоняющее (тепловое) поглощение происходит вследствие потерь при соударении возмущенных радиоволной электронов, в основном, с нейтральными частицами. В окрестности области отражения лучевая траектория распространения радиоволны загибается в плоскости магнитного меридиана, тем самым существенно удлиняется, вследствие чего происходит интенсивное (на

единицу высоты по вертикали) ослабление. Этот эффект особенно выделяется при распространении радиоволн на частотах близких критическим, и называется отклоняющее поглощение. Описанные эффекты ослабления имеют значительные характерные времена, их вариации являются следствием масштабных вариаций электронного содержания ионосферы, вызванными различными гелиогеофизическими факторами.

Амплитуда отраженной от ионосферы радиоволны также испытывает флуктуации связанные с наличием в области отражения мелкомасштабных неоднородностей плазмы, которые вызывают эффекты фокусировки/дефокусировки. В литературных источниках неоднократно описываются вероятностные характеристики этих неоднородностей, определяемых по данным статистического анализа отраженных сигналов [3, 4, 9, 31]. Неоднородности имеют линейные размеры от 10^{-1} до 10^5 м, диапазон характерных времен существования от 10^{-1} до 10^3 секунд, что говорит [3, 42] о сложности и разнообразии процессов их возникновения и развития.

Для плоской электромагнитной волны, нормально падающей на плоскострустную, горизонтально изотропную ионосферу, в геометрикооптическом приближении, огибающая амплитуды в точке приема может быть описана как суперпозиция рассеянной и зеркальной волн:

$$R_0(t) = [(E_0 \cos \varphi_0 + E_s \cos \varphi_s)^2 + (E_0 \sin \varphi_0 + E_s \sin \varphi_s)^2]^{1/2},$$

где E_0 , w_0 , φ_0 – амплитуда, частота, фаза регулярной компоненты. E_s , w_s , φ_s – случайные амплитуда, частота, фаза рассеянных волн.

Экспериментальные данные показывают [7, 26, 49] что в 70 % случаев плотность вероятности амплитуды первого кратного отражения может быть описана распределением Накагами-Райса, т.е. логарифмически нормальным законом распределения с несколькими гауссовыми составляющими. Для оценки справедливости использования амплитудных данных пользуются параметром

«мутности ионосферы» β^2 , который характеризует соотношение сигнал/шум радиоимпульсов вертикального зондирования. Коэффициент мутности ионосферы для логнормального распределения [3, 26, 33]:

$$\beta^2 = \frac{E_0^2}{2\sigma^2} = \frac{E_0^2}{\langle E_s^2 \rangle}$$

Величина коэффициента мутности не бывает меньше единицы, по многочисленным экспериментам, наблюдаемые значения лежат в пределах 1-7, с наиболее вероятным значением 2-3 [49].

Исходя из обширного практического применения метода А1, для расчета статистически значимого среднего (по времени) значения коэффициента отражения в импульсном методе А1, интервал усреднения при зондировании со скважностью 1 импульс в секунду составляет от 1 до 3 часов. Некоторыми исследователями с целью ускорить процесс регистрации ионосферного поглощения, и одновременно увеличить дискретность получения величин поглощения, были предложены различные вариации метода А1, например реализующие скользящее среднее взамен прямого накопления амплитуд наблюдений [6,7,11]. В работе [21] показана возможность в предположении эргодичности во временной и частотной области процесса отражения радиоволн от «шероховатого зеркала», получен эффекта уменьшения времени усреднения при качании частоты (ЭУВУКЧ). Описываются условия стационарности и равенства дисперсий налагаемые на исследуемые реализации на различных частотах. Отметим, что выполнение этих условий является экспериментальным доказательством эргодичности процесса отражения, независимо при наличии даже слабого ЭУВУКЧ.

1.4 Подходы к восстановлению профиля электронной концентрации в нижней ионосфере по данным ВЗ

Как было отмечено во введении, на ионограммах ВЗ не регистрируются отражения от D области. Для решения неопределенности начальной высоты ионосферы, при расчете профилей N_h по данным ионограмм ВЗ, прибегают либо к допущению равенства действующей и истинной дальности на минимальной частоте ионограммы f_{min} , что равносильно отсутствию ионизации в D и E-областях ниже этой частоты, либо присоединяют некоторый соответствующий модельный профиль. Таким образом, учет нижней ионосферы возможен лишь при использовании дополнительной информации о среде.

В литературе можно найти несколько способов определения профилей электронной концентрации в D-области на основе использования дополнительной информации ионозондов [19, 26, 58] и даже данных поглощения глобальных навигационных систем [82]. В целом, они сводятся к многократному решению прямой задачи расчета поглощения, используя модельное параметрическое распределение электронной концентрации, и последующего решения обратной задачи. В зависимости от количества и качества исходных данных – использовании данных поглощения на одной или нескольких частотах. Для проверки работоспособности метода определения профиля электронной концентрации по данным ВЧХ ионосферы традиционно используются таблицы [66]. При использовании дополнительно определенного профиля в D области, его конечные высоты добавляются к результатам определения ВЧХ [18, 35], и входят как параметры в стандартные алгоритмы расчета полного профиля [18, 74] .

Успешные эксперименты по сравнению данных получаемых методом [20] с данными ракетных измерений прецизионным методом интерферометра показывают объективность такого подхода. Альтернативный подход в постановке задачи определения профиля нижней ионосферы, отталкиваясь только от

изменения действующей дальности, имеет меньшую чувствительность, из-за малого вклада нижележащей ионосферы в интеграл действующей дальности.[18].

Отметим, что существует метод частичных отражений [28], заключающийся в регистрации отражений от случайно возникающих неоднородностей на высотах нижней части E слоя, с последующим восстановлением N_h профиля. Однако, реализация такого метода используя имеющуюся аппаратуру ВЗ будет затруднена необходимостью режимного использования ионозонда согласно регламента наблюдений Росгидромета.

Выводы по главе 1

Измерение ионосферного поглощения радиоволн затруднено наличием фединга амплитуды, вызванного эффектами фокусировки/дефокусировки на мелкомасштабных неоднородностях в окрестности области отражения. Статистические характеристики фединга таковы, что отстроится от него возможно используя усреднение сигнала. Метод А1 предполагает усреднение по времени. Для уменьшения времени получения данных и решения сопутствующих проблем [21], предложено использования в дополнение к усреднению во временной области усреднение частотной области отраженных от ионосферы радиосигналов. В результате работы был получен экспериментальный результат, показывающий возможность, а также преимущества использования такого усреднения.

Существует методика расчета параметров модельных профилей электронной концентрации в D и нижней части E – области ионосферы по данным ионограммы ВЗ (ВЧХ) и величине ионосферного поглощения радиоволн, результаты которой хорошо сходятся с прецизионными эмпирическими ракетными профилями в указанных областях.

С развитием ионозондов ВЗ, цифровая ионограмма ВЗ потенциально является «готовым набором» необходимой информации о поглощении радиоволн, подготовленной к усреднению во временной (вследствие сдвига по времени между зондирующими импульсами) и частотной областях.

Указанное выше есть предпосылки к анализу возможностей ионозонда ВЗ в целях расчета поглощения и профиля электронной концентрации в нижней ионосфере.

2 Аппаратура исследования

2.1 Требования к аппаратуре

Для проведения экспериментального и систематического измерения поглощения радиоволн, рассчитывая использовать для этих целей ионозонд вертикального зондирования [14], необходимо выделить требования к используемой аппаратуре. Их можно определить, последовательно рассмотрев этапы генерации, усиления и излучения зондирующего импульса, а также надежной регистрации отраженного сигнала, учитывая ионосферные задержки по времени и ослабление сигнала, разрешения по времени, частоте и амплитуде на этапах генерации и регистрации. Также существенными для анализа являются организация смены рабочих частот, график регистрации ионограмм вертикального зондирования,

Для надежной регистрации отраженных от ионосферы радиоволн необходимо иметь достаточный запас по мощности импульса, такой что отраженная ионосферой волна, на приемной антенне могла создавать достаточный выделяющийся над уровнем шума сигнал, надежно регистрируемый приемной аппаратурой ионозонда.

Современные цифровые ионозонды позволяют регистрировать, в том числе, амплитуды отраженных от ионосферы сигналов и имеют достаточный динамический диапазон регистрируемых значений амплитуды. Должна присутствовать возможность записи и последующей обработки ионограмм вертикального зондирования в виде 3-х мерных массивов амплитуды-частоты-действующей дальности. Антенны, их количество а также их взаимное расположение должно обеспечивать эффективное излучение во всем диапазоне зондирования (передающая) и разделение магнитоионных компонент по принципу поляризации при регистрации отраженных от ионосферы радиоволн (приемная).

2.2 Ионозонд «Парус -А»

Ионозонд «Парус-А», поступивший в распоряжение автора, состоит из 4 блоков – приемник, передатчик, усилитель, компьютер управления зондированием и компьютер обработки. Блоки передатчика и приемника обладают следующими характеристиками, указанными в табл 1 и табл 2 соответственно.

Таблица 1. Характеристики передатчика

Диапазон рабочих частот	1-20 МГц
Погрешность времени задержки радиоимпульса	+ 12 мкс
Импульсная мощность излучения	12-15 кВт
Потребляемая мощность	0,6 кВт

Таблица 2. Характеристики приемника

Чувствительность	5 мкВ
Диапазон регулируемого усиления	110дБ

Динамический диапазон	100 дБ
Разделение выходных каналов (программно-аппаратное)	>12 дБ

Усилитель передатчика позволяет достигать импульсной мощности излучения, сравнимой с мощностью специализированных установок по определению поглощения.

Структура базы данных позволяет компактно хранить первичные данные ионограммы в бинарном формате. На запись величины амплитуды отраженного сигнала (в дБ) выделяется 8 бит АЦП и для каждой ионограммы записывается величина усиления предусилителя, также 8 бит. Дискретность данных по высоте – $dh=1,5$ км, по частоте в диапазоне от 1 до 3 МГц дискретность $df=25$ КГц, в диапазоне от 3 до 20 МГц $df=50$ КГц.

В составе государственной наблюдательной сети Росгидромета работает 12 ионозондов «Парус-А», данные которых потенциально могут быть использованы для реализации алгоритма регистрации ионосферного поглощения радиоволн, с применением усреднения, как во временной, так и в частотной области. Первые ионограммы ВЗ ионозонда «Парус-А», расположенного в ИЗМИРАНе, доступные в базе данных ИПГ, были получены в мае 2011 года. Непрерывный ряд 15 минутных измерений продолжается с ввода в эксплуатацию.

2.3 Московская ионосферная станция в ИЗМИРАНе

АФК ионосферной станции в ИЗМИРАНе [43], представляет собой два ромба с длиной пар проводов 31.3+34.2 м малого ромба и 59.5+61.3 м большого. Высота металлических двух боковых опор 16 м и центральной мачты – 36 м.

Передатчик подключается в диапазоне 1-5 МГц – к большому ромбу, а в диапазоне 5-20 МГц – к малому. Питание антенн производится в верхних точках ромбов (рис. 5).

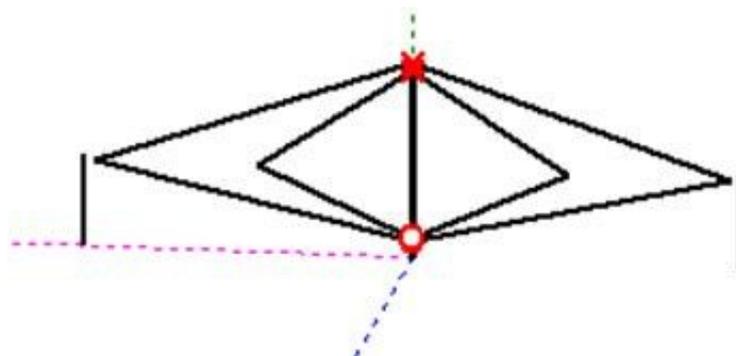


Рис. 5 Антенна ионозонда «Парус-А» в ИЗМИРАНе [43],

Зависимость коэффициента усиления антенны показана на рисунке 6. Для интересующего нас диапазона 1,3 – 3 МГц, коэффициент усиления увеличивается от 1 до 5 дБ. Отметим, что отражения на частотах ниже 1,3 как правило отсутствуют из-за высокого поглощения, поэтому не будем исключать их из анализа, главным образом, для сохранения возможности получения крайне низких величин поглощения, вероятно в ночные и/или зимние периоды. Естественно, каждый АФК имеет свою АЧХ в зависимости не только от геометрических характеристик антенны, но и подстилающей поверхности.

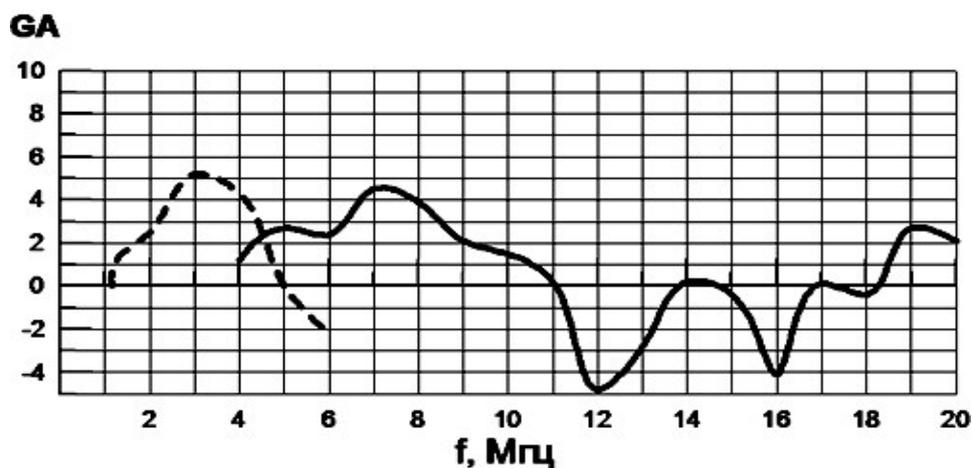


Рис. 6 Коэффициент усиления антенны (дБ). пунктиром показан КУ большого ромба, сплошной линией – малого ромба.

2.4 Решающий эксперимент о возможности расчета поглощения

Попробуем реализовать несложный эксперимент с целью проверки факта установления (уменьшения биения) среднего значения амплитуды в частотном диапазоне одного ионоферного слоя, аналогично результатам [9, 21], по данным отражений ионосферы ионозонда «Парус-А».

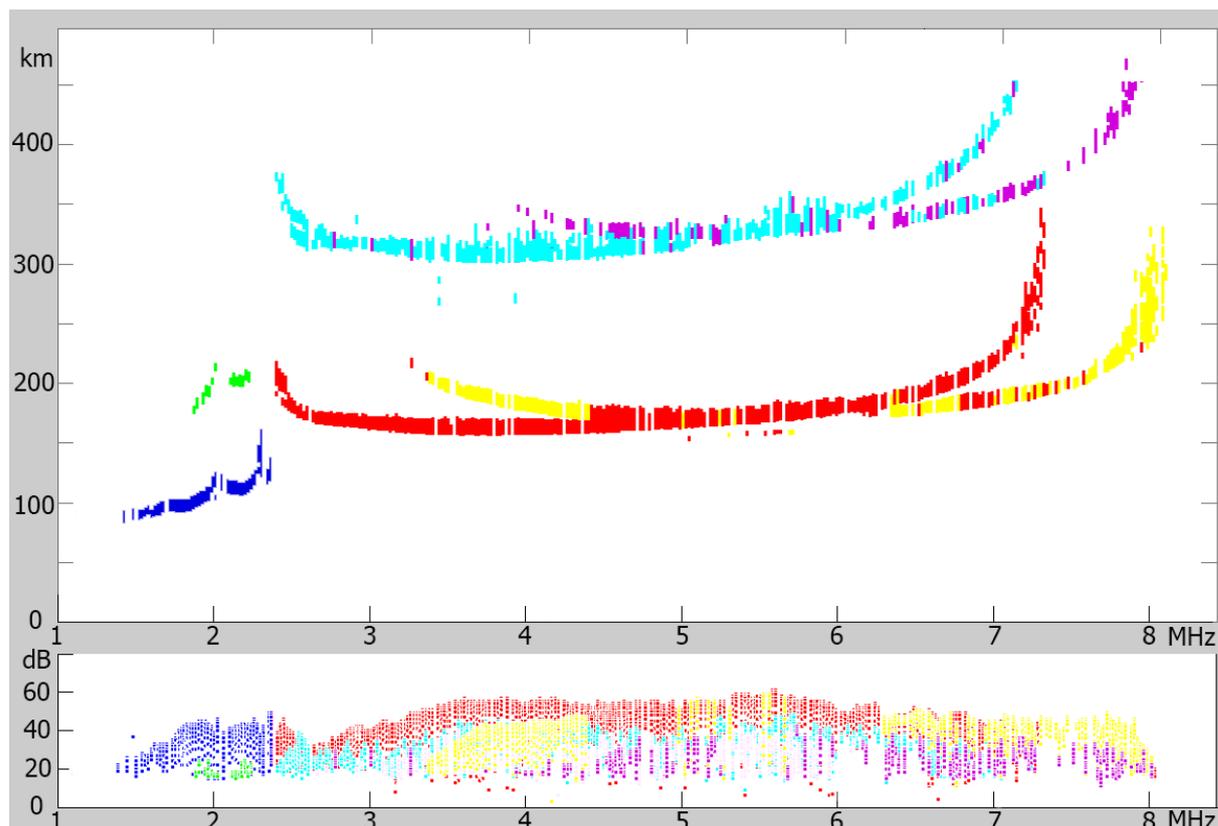


Рис. 7 Ионограмма ионозонда «Парус-А». Стандартное представление ВЧХ в верхней части дополнено АЧХ в нижней части, цветом выделены отражения различных слоёв и их магниторасщепленные компоненты.

На рисунке 7 приведена ионограмма ионозонда «Парус-А». Разделение магнитоионных компонент происходит на аппаратном уровне.

Для усреднения амплитуд сигналов по частоте первоначально выбран следующий алгоритм действий. На первом шаге выбираются три частоты, а именно: рабочая частота и две соседние, отличающиеся от рабочей на величину

частотного дискрета ионозонда в большую и меньшую стороны. Усредненная амплитуда есть среднее арифметическое число для амплитуд этих трех частот. На втором шаге добавляются еще две частоты, отличающиеся от рабочей на величину двух частотных дискретов ионозонда. Усредненная амплитуда есть среднее арифметическое для 5-ти частот. Далее следует аналогичным образом третий шаг и т.д.

Показанные на рисунке 8 данные 8(восьми) ионограмм свидетельствуют о установлении среднего по частоте значения амплитуды, т.е. о стационарности процесса отражения зондирующих радиоволн от ионосферы в частотном диапазоне слоя E в течении времени регистрации одной ионограммы.

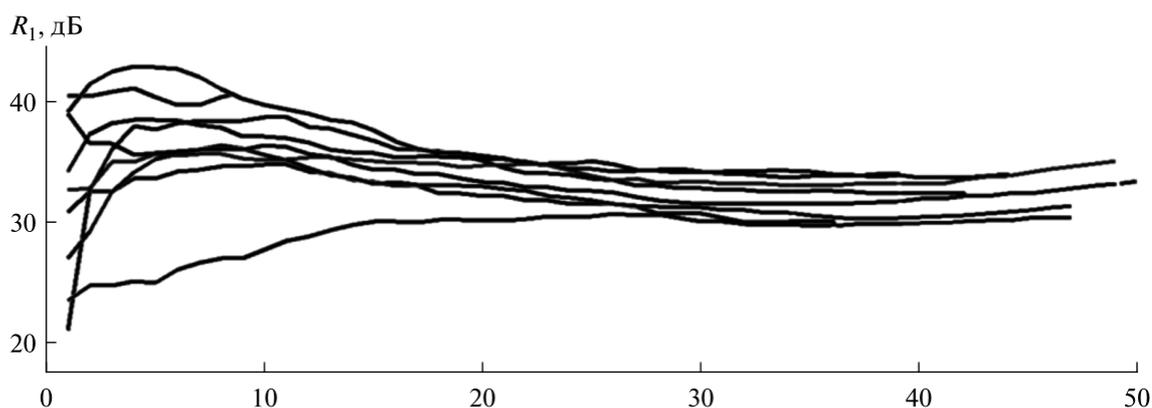


Рис. 8 Динамика установления среднего значения амплитуды отраженного радиосигнала по частоте в увеличивающемся частотном диапазоне. По абсциссе отложено число отсчетов частоты, вошедших в усреднение. Используются отражения слоя E, по данным 8-ми ионограмм, зарегистрированных в условиях невозмущенной ионосферы в равноденствие 22 марта 2013 г. [23]

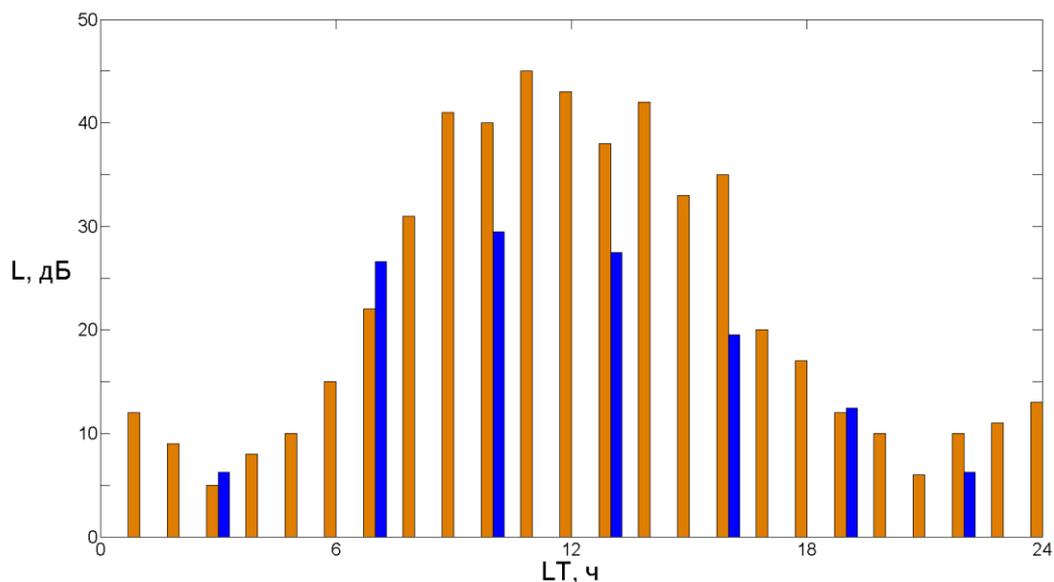


Рис. 9 Желтые столбцы – величины поглощения по данным метода A1 для равноденствия [52], синие столбцы – экспериментальные величины поглощения по данным ионограмм, равноденствие 22 марта 2013 г. [13]

Из рисунка 9 заметно качественное совпадение суточной вариации величины поглощения, а также совпадения порядка величины.

Для ионосферных трасс характерно существование частотной корреляции, то есть равенство характеристик распространения внутри некоторого малого частотного диапазона. Частотная корреляция характерна и для поглощения радиоволн. По результатам эмпирических и теоретических оценок характерный радиус частотной корреляции составляет от 1 до 10 КГц [7, 21, 40] и применение более мелкого шага по частоте при получении выборки не увеличит её репрезентативность [34]. Используемая в ионозонде «Парус-А» сетка зондирования имеет шаг по частоте 25 КГц в диапазоне 1-3 МГц и 50 КГц в диапазоне 3-20 МГц, что заведомо больше радиуса частотной корреляции и устраняет его влияние на результат эксперимента.

Выводы по главе 2

Результаты анализа возможностей аппаратуры входящей в состав ионозонда «Парус-А», показывают возможность использовать ионограммы ионозонда в качестве входных массивов для алгоритма расчета поглощения радиоволн. Проведенный эксперимент с установлением среднего значения амплитуды в увеличивающемся частотном окне, по данным одной ионограммы вертикального зондирования, показал возможность использования данных ионозонда «Парус-А» для оценки поглощения радиоволн.

3 Сведения по вариациям поглощения

Ионизация нижней ионосферы происходит, в основном, за счет ионизирующего излучения Солнца – солнечного рентгена и ультрафиолета, достигающих высот области D. Это излучение взаимодействует с нейтральной атмосферой, ионизируя ее. В свою очередь, как было показано в главе 1, ионизация D-области интегрально определяет поглощение радиоволн КВ диапазона. Из этого можно сделать несколько выводов о причинах возможных вариаций поглощения.

Первый – вариации поглощения, как и общее электронное содержание ионосферы подвержено вариациям геометрии падения солнечного излучения – таким образом возникают сезонные и суточные вариации.

Второй – вариации обусловленные неперiodическими и периодическими изменениями характеристик потока ионизирующего излучения и энергичных частиц, например циклы солнечной активности и вспышечные явления.

Третий – вариации поглощения могут зависеть от динамики нейтральной компоненты – так общепринятая теория описывает возникновение аномального поглощения (зимнюю аномалию поглощения и внезапные стратосферные потепления).

В рамках этой работы мы ограничимся этим кругом явлений, однако могут вносить существенные изменения в баланс ионизации явления вторжения высокоэнергичных частиц – хорошим примером этого может служить явление внезапного увеличения поглощения в полярной шапке (ППШ). Следует также указать на возможность как искусственного, так и естественного локального изменения поглощения вследствие изменения структуры ионосферной плазмы – работа ракетного ускорителя, следы метеоров, мощные радиоволны и т.д.

Интересным, но редко наблюдаемым природным «экспериментом» по изменению потока солнечного агента ионизации являются солнечные затмения. Увы, наблюдение такого в марте 2015 сопровождалось сильной магнитной бурей, которая скрыла эффект затмения, а других затмений за доступный период наблюдений не наблюдалось.

3.1 Периодические вариации поглощения, обусловленные геометрией солнечного излучения (суточно-сезонные) и солнечной активностью

Для описания модели суточно-сезонных вариаций, достаточно, как описано выше, выделить источник изменения параметра ионизирующего агента. Таким параметром наглядно выступает зенитный угол Солнца, определяемый отклонением направления на Солнце от вертикали γ , или наоборот, угол возвышения солнца над горизонтом $(90-\gamma)$. Географическая широта определяет сезонный максимум γ , географическая широта и сезон определяют суточный максимум. Текущее положение определяется указанными параметрами и временем суток. Таким образом, сезонная вариация поглощения будет иметь максимум 22 июня (для северного полушария), а суточная вариация в местный полдень.

Индекс $F_{10.7}$ – излучение Солнца с длиной волны 10,7 см, измеряется в солнечных единицах потока (с.е.п.) $1 \text{ с.е.п.} = 10^{-22} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$. Индекс $F_{10.7}$ хорошо коррелирует с индексом R, числом солнечных пятен – активных областей на Солнце и характеризует интегральную солнечную активность. В литературе можно найти (для экваториального региона) указания [25] на линейную зависимость поглощения радиоволн от индекса $F_{10.7}$ вида:

$$L_{2,5}(F_{10.7}, \gamma) = a_0 \cdot (1 + b \cdot F_{10.7}) \cdot \cos^h(\gamma),$$

где a_0, b, h – некоторые параметры.

Для среднеширотной ионосферы [69], в общем случае, подобные формулы будут неверны вследствие большей зависимости от геомагнитной активности, аномального поглощения, однако для невозмущенных геофизических условий, в периоды отсутствия ЗА, вероятно, следует ожидать подобную форму зависимости.

3.2 Непериодические вариации – следствия солнечных вспышек.

Основной источник ионизации D- области – поток солнечного рентгена и ультрафиолета. Иные более Во время вспышки солнечный поток рентгеновского и ультрафиолетового излучения скачкообразно, многократно усиливается. Это приводит к резкому увеличению ионизации нижней ионосферы [45, 79]. Всплеску в указанных диапазонах сопутствует поток высокоэнергичных частиц, также существенно влияющий на ионизацию земной атмосферы. Однако, мы будем рассматривать только волновую составляющую – рентген и ультрафиолет, эти явления удобно разделяются по времени, скорость распространения даже релятивистских частиц, а тем более коронарного вещества значительно ниже, а эффекты дополнительной ионизации имеют другие механизмы.

Основной и наиболее яркий эффект, наблюдаемый в ионосферном поглощении КВ радиоволн при вспышке в рентгене – SWF – short wave fadeout – замирание коротких волн – резкое частичное или полное поглощение ВЧ радиоволн. Его нетрудно наблюдать в амплитуде сигнала на любой (дневной) ионосферной КВ радиотрассе [45], но следует отделять его от эффектов изменения числа скачков, интерференции и других возмущений различной природы – геомагнитной (буревой) и эффектами движения неоднородностей ионосферы. Эффект увеличения ослабления радиоволн, сопутствующий

солнечной вспышке можно наблюдать и в других диапазонах, например при наблюдении космических шумов на частотах 20-30 МГц (метод А2).

В [25] описана аналитическая модель поглощения радиоволн в зависимости от интенсивности солнечного рентгеновского излучения U в диапазоне 0.1-0.8 нм. Митра [45] указывает на линейную зависимость коэффициента ионизации от U . Например, для поглощения L на частоте 2.2 МГц для экваториальной ионосферы над Коломбо [63, 64] были получены эмпирические зависимости поглощения от U и зенитного угла χ :

$$L_{2,2}(U, \gamma) = L_0 \cdot U^{0.143} \cdot \cos(\gamma)^m,$$

где m и L_0 - несколько различны для разных периодов суток.

Для среднеширотной ионосферы, в общем случае, подобные формулы также будут неверны, вследствие большей зависимости от геомагнитной активности и аномального поглощения, однако для невозмущенных геомагнитных условий, летом, вероятно, следует ожидать подобную форму зависимости при выделении численного эффекта конкретной солнечной вспышки.

С точки зрения проверки алгоритма расчета ионосферного поглощения радиоволн, по данным отражений КВ при ВЗ ионосферы ионозондом, вместе с SWF наиболее интересен эффект SIF – внезапное повышение частоты f_{min} , которое легко наблюдать по данным ионограмм ВЗ. Параметр f_{min} – минимальная частота на которой отраженный сигнал превышает уровень чувствительности приемной аппаратуры ионозонда. На частотах ниже f_{min} отражения не регистрируются.

Совокупно f_{min} определяется:

- чувствительностью аппаратуры
- ионосферным поглощением
- уровнем шумов

Все эти факторы имеют собственные зависимости от частоты зондирующего импульса, но в целом, с известными допущениями минимальную частоту ионограммы f_{min} можно применять в качестве индикатора ионосферного поглощения радиоволн. Так, для существенного увеличения базы исследования, пользуются величинами поглощения радиоволн, рассчитанные через f_{min} . Также этим приемом пользуются в отсутствие данных прямых измерений величин поглощения в нижней ионосфере [25 ,42]. Митра приводит список эффектов в поглощении, которые возможно зарегистрировать через f_{min} , включая эффекты аномалий (см. раздел 3.3) и *sudden ionospheric disturbance* (SID). Для количественной оценки ионосферного поглощения там же приводится выражение:

$$L = K (f_{min} - f_L)^2$$

где K – коэффициент пропорциональности (вероятно, как и факторы, влияющие на f_{min} , должен иметь зависимость от частоты f_{min}), f_L – продольная компонента гирочастоты.

Таким образом, следует ожидать высокую степень корреляции между рядами величин поглощения и f_{min} .

3.3 Среднеширотная Зимняя аномалия поглощения радиоволн

Речь идет о явлении в сезонной вариации поглощения радиоволн, зарегистрированном при вертикальном зондировании ионосферы. Указывается [3, 24] на явление сезонной Зимней аномалии (ЗА) возникающее как аномальное, при фиксированном зенитном угле Солнца, увеличение электронной концентрации в D-области, в дневное время, в результате усиления турбулентности нижней ионосферы, регистрируемое как увеличение поглощения в нижней части КВ диапазона (1.5-3 МГц).

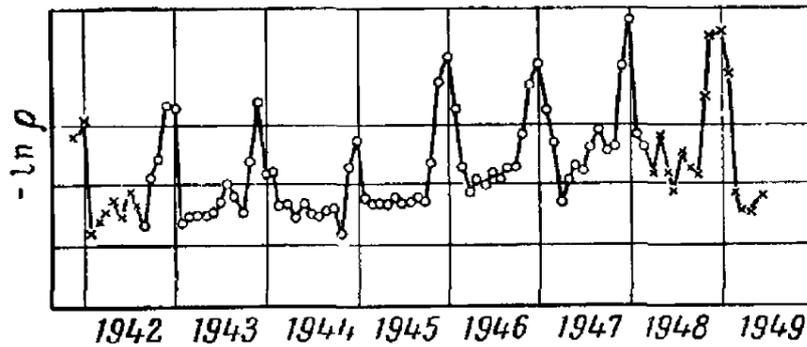


Рис. 10 Вариации среднемесячных значений поглощения по данным среднеширотной станции [3], при фиксированном значении зенитного угла Солнца ($\chi=75^\circ$) и частоте.

Основные особенности ЗА собраны А.В. Даниловым в обзоре [25]:

1. Явление ЗА локализовано в средних широтах (40-60 град) при этом, указания на явление зимней аномалии в южном полушарии редки, возможно в силу неравномерности расположения наблюдательных станций.
2. Максимальный эффект наблюдается в диапазоне 2-2.5 МГц.
3. Избыточное поглощение («аномальная» добавка к «нормальному» поглощению, наблюдаемому при том же зенитном угле) сложным образом зависит от планетарных индексов геомагнитной и солнечной активности и вероятно, имеет зависимость от частоты.



Рис. 11 Сущность явления зимней аномалии поглощения радиоволн. Фиксированные параметры: рабочая частота зондирования (2,6 МГц) и зенитный угол Солнца [63].

Последняя особенность хорошо объясняется в рамках общепринятой теории ЗА, которая объясняет её увеличением концентрации электронов на высотах 75-85 км, где находится максимум функции поглощения от высоты для радиоволн КВ диапазона. Повышение концентрации электронов, в свою очередь, вызывается повышением количества NO, ростом скорости ионизации вследствие роста температуры нейтральной атмосферы, который уменьшает коэффициент рекомбинации.

Из рисунка можно выделить [16] некоторые особенности ЗА в сезонной вариации. Максимум прибавки аномального поглощения достигается в январе; наблюдается асимметричность относительно января – значения поглощения в декабре и ноябре выше аналогичных в феврале и марте; минимум поглощения достигается в апреле.

К аномальному увеличению относят также явление внезапного стратосферного потепления (ВСП). В отличие от ЗА, явления [16, 29, 42] ВСП имеют иные временные масштабы, а именно – несколько суток. В периоды ВСП, резко возрастает электронная концентрация в D-слое и, следовательно, поглощение.

3.4 Несимметричность суточного хода поглощения

Дневная ионизация области D, определяющая ионосферное поглощение для КВ диапазона, ионизируется солнечным ультрафиолетом и рентгеном [3]. Времена отклика на изменение параметров ионизирующего агента являются незначительными в сравнении с суточными вариациями поглощения, вызванными изменением угла под которым падает излучение. На фоне этого, интересно явление несимметричности суточного хода поглощения, которое заключается в том, что при равном отдалении по времени от локального полудня, при равных углах Солнца, наблюдаемые после полудня величины поглощения превышают величины, наблюдаемые перед полуднем. Рисунок 12 описывает суть явления. Ластовичка [68] наблюдал асимметрию суточного хода в период с 1960 по 1973 г. в данных ионосферного поглощения, определяемого на наклонной трассе (метод А3) на частоте 2.775 МГц, при эквивалентной частоте $V3 \sim 1$ МГц. Механизм возникновения явления неясен, но он, вероятно может быть связан с изменением циркуляции и содержания NO, как определяющего ионизацию в D области. Также указывается на возможную связь явления с ZA, также через вариации NO2. Таблица 1 показывает наблюдение явления асимметрии суточного хода по годам и месяцам. Из таблицы можно сделать вывод, что наблюдение асимметрии практически гарантированно во все месяцы, кроме января и декабря.

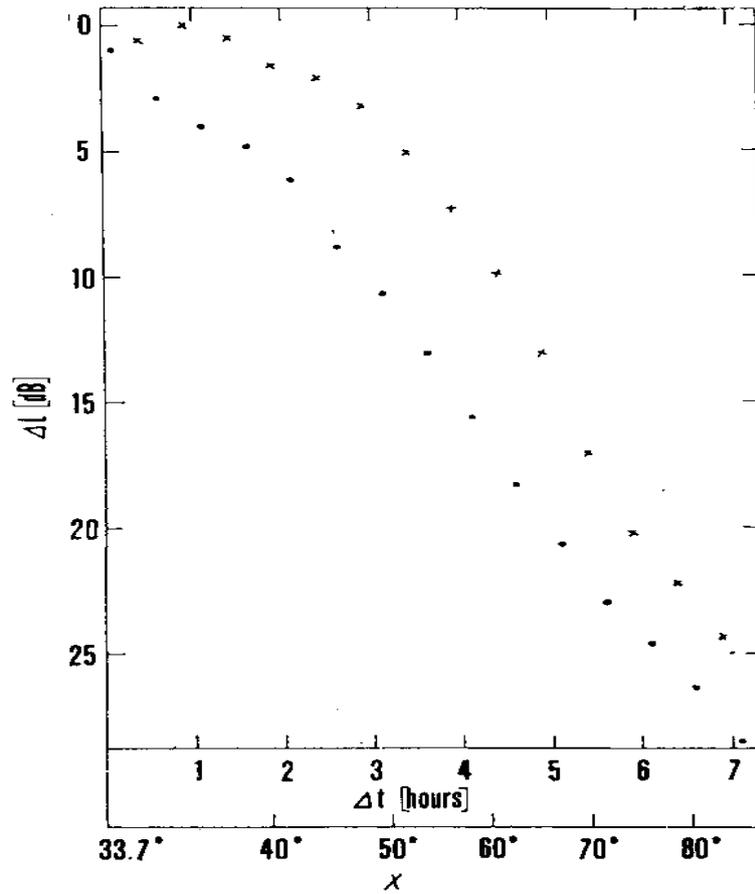


Рис. 12 Суть явления дневной асимметрии. Усредненные за месяц суточные вариации поглощения радиоволн. Май, 1966 - 1973. $\Delta L = L_{max} - L$, $\Delta t = |t_{noon} - t|$; Крестики – значения поглощения после полудня, точки – до полудня

Таблица 1 Наблюдение асимметрии суточного хода поглощения. [68]

Month	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1960	N	N	N	N	+	+	+	+	+	0	-	0
1961	0	+	+	+	+	0?	+	+	-	-	+	-
1962	-	0	+	+	+	+	+	+	0	0	0	+
1963	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	+	-
1964	-	0	+	+	+	+	+	+	0	+	+	+
1965	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	N	+
1966	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
1967	-	+	+	+	+	+	+	+	+	0	0	0
1968	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
1969	0	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+	0
1970	0	0	+	+	+	+	+	+	N	-	-	0
1971	0	+	N	+	N	N	N	+	+	-	0	+
1972	0	+	+	+	+	+	+	+	+	0	0	+
1973	+	-	0	+	+	N	N	N	N	N	N	N

«+» - после полудня значения выше, чем до полудня;

«-» - до полудня значения выше, чем после полудня;

«0» – отсутствие асимметрии;

«N» – нет данных.

3.5 Возможности сетевого ионозонда для наблюдения вариаций поглощения

В соответствии с требованиями Всемирной Метеорологической Организации (WMO) и руководящей документации [86], сетевые ионозонды работают в 15 минутном режиме зондирования для регулярных прогностических задач. Некоторые исследовательские задачи требуют еще меньших времен между зондированиями. В таком случае, ионозонд «Парус-А» имеет возможность работы в непрерывном (без интервала между ионограммами) или 1 – минутном режиме зондирования ионосферы. Таким образом, в базе данных ИПГ сформирован единогоформатный архив ионограмм с промежутками между регистрацией не

больше 15 минут ВЗ московской ионосферной станции, с момента установки текущего оборудования (1.06.2011) до настоящего времени (на момент написания этих строк 1.10.2016).

Накопленный массив 15-ти минутных ионограмм с регистрацией амплитуд отраженных ионосферой радиосигналов ВЗ, учитывая теорему Котельникова о частоте дискретизации, потенциально позволяет исследовать суточные, сезонные, периодические вариации величины поглощения. Непериодические вариации длительностью больше 15 мин и меньше 30 мин будут представлять собой единичные изменения величины, обнаружение событий длительностью меньше 15 минут будут зависеть от соотношения времен ВЗ и начала события.

3.6 Критерии работоспособности метода, на основе наблюдения вариаций поглощения

Сформулируем критерии к разрабатываемому методу – должны выполняться следующие условия:

- 1) воспроизведение всех известных закономерностей в вариациях сезонного, суточного хода поглощения радиоволн, в т.ч. повторяющиеся аномалии сезонного хода.
- 2) регистрация воздействия вспышечных явлений (m-,c-,b- вспышки рентгена)
- 3) легитимность математического аппарата, отсутствие нелинейных преобразований амплитуды.
- 4) выполнение требования равенства средних значений по частоте средним по времени (эргодичность процесса).
- 5) возможность преобразования в классические величины поглощения радиоволн для использования в алгоритмах прогноза распространения КВ

Выводы по главе 3

Ионосферные процессы, приводящие к вариациям ионосферного поглощения радиоволн, имеют различную природу. Периодические вариации связаны с геометрией падения солнечного ионизирующего агента, имеют суточные, сезонные циклы. В вариациях потока наблюдаются солнечные циклы. Солнечные вспышки проявляются как спонтанные увеличения потока энергии в УФ-диапазоне и рентгене, и приводят к непероодическим вариациям поглощения. Также, изменения в нейтральной атмосфере приводят к вариациям поглощения.

Накопленный массив 15- минутных ионограмм с регистрацией амплитуд отраженных ионосферой радиосигналов ВЗ потенциально позволяет исследовать суточные, сезонные, а также непероодические вариации величины поглощения.

При соблюдении указанных условий, данные поглощения, полученные разрабатываемым методом будем считать равноценными данным метода А1. Такие данные могут быть использованы для расчета профилей электронной концентрации в D области ионосферы при известном профиле эффективной частоты соударений электронов.

4 Метод расчета поглощения по данным ионозонда «Парус-А»

4.1 Амплитудный фактор. Усреднение по частоте величины поглощения и усреднение по времени амплитуд отраженных ионосферой КВ радиоволн.

Итак, для перехода от усреднения по времени к усреднению в частотном диапазоне величин поглощения радиоволн, примем следующие допущения для некоторого диапазона стационарности во времени (на время регистрации ионограммы) и по частоте (в диапазоне плазменных частот слоя E, вдали от критической):

- 1) Основным источником быстроменяющейся компоненты поля является фокусировка/дефокусировка на мелкомасштабных неоднородностях плазмы вблизи области отражения.
- 2) Нормальное распределение величин максимумов отклонений dN электронного содержания относительно среднего N на этой высоте.
- 3) Равномерное распределение вероятности появления неоднородностей по высотам (в области отражения слоя E).
- 4) Зависимость поглощения (в дБ) от частоты считаем линейной.

Рассмотрим статистику амплитуд отражений от ионосферы на фиксированной частоте, её реализации по времени. Они хорошо описывается распределением Нагаками–Райса, мы же предположим еще более частный, отмеченный в работе [21], как следствие допущения №2, случай нормального закона распределения рассеянного сигнала на фиксированной частоте.

Переход к усреднению в частотном диапазоне, при монотонном профиле $N(h)$, эквивалентен переходу к усреднению по высотам отражения. Природа

фединга амплитуды при отражении от резкого градиента электронной концентрации в слое E, для частот далеких от критической неизменна. Предположим равномерное распределение вероятности появления рассеянного сигнала в зависимости от частоты – главным аргументом к этому является допущение №1. Изменение истинной высоты отражения исследуемых радиоимпульсов в диапазоне слоя E не превышает 5-10 Км, из чего следует допущение №3. Учитывая в расчете ослабления действующие дальности на каждой частоте, будем считать отражения на различных частотах реализациями одного процесса.

Допущение №3, несмотря на то что излишне упрощает картину частотной зависимости поглощения от частоты, является необходимым для того чтобы не смещать оценки среднего арифметического по частотному ряду. Ошибка этого приближения может быть рассчитана из решения обратной задачи – расчета поглощения радиоволн в частотном диапазоне одного ионосферного слоя и последующего использования предложенного метода. С другой стороны, также можно оценить ошибку учитывая известную зависимость «зеркальной» компоненты ослабления амплитуды от частоты, включающую неотклоняющее и отклоняющее поглощение в области близкой высоте отражения, описанную в п.1.2.

Теперь, пусть $W_t(L)$ – функция плотности вероятности на фиксированной частоте от времени, имеет нормальный закон распределения. Из допущения №2 и №3 следует, что двумерная функция плотности вероятности $W_{f,t}(L)$ от частоты при переменном времени, будет также нормально распределена. В случае, если эти допущения верны, выборка поглощения по частотам будет иметь нормальное распределение [34], на предмет соответствия которого мы будем проверять данные исследуемой ионограммы – выборку поглощения по частоте - для возможности использования конечной статистики.

При нормальном законе распределения вероятности появления неоднородностей по высоте – частоте, в силу свойств двумерного нормального распределения, в выборке только по частотному диапазону, также будет наблюдаться нормальное распределение.

Обобщим следствия допущений:

1. Логнормальное распределение величин поглощения в выборке по частотам, на это указывает Черкашин [21].
2. Флуктуирующая компонента имеет нулевое математическое ожидание в выборке по частотам.
3. Средняя величина поглощения соответствует средней частоте.

В качестве входных метода данных будем использовать частотные ряды амплитуд и действующих высот, получаемые из ионограммы, а также постоянную аппаратуры на каждой частоте $G_0(f)$.

Постоянная аппаратуры (1) характеризует уровень мощности зондирующей волны, учитывая падение амплитуды на единице действующей дальности из-за сферичности фронта волны:

$$G_0 = R_1 + 20 \lg(h'),$$

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

Запишем мгновенную амплитуду R_1 в зависимости от частоты f :

$$R_1(f) = G_0(f) - 20 \lg(h_0(f)) - L_n(f) - L_o(f),$$

где L_n - поглощение и ослабление в отклоняющей и неотклоняющей областях ионосферы, L_o - быстроменяющаяся компонента поглощения из-за фокусировки/дефокусировки.

Тогда выражение для поглощения на каждой частоте:

$$L(f) = L_n(f) + L_o(f) = G_0(f) - R_1(f) - 20 \lg(h_0(f)). \quad (3)$$

Значения $L_n(f)$ изменяются в частотном диапазоне одного ионосферного слоя монотонно, учитывая описанные выше допущения, можно считать: $\langle L_n(f) \rangle = L_n(\langle f \rangle)$, где $\langle \rangle$ – обозначение арифметического среднего. Влияние фокусировки/дефокусировки волны на неоднородностях, предполагается нормально распределённой случайной величиной, из следствия №2, $\langle L_o(f) \rangle \rightarrow 0$.

Тогда из (3) получаем окончательное выражение для поглощения:

$$\langle L(f) \rangle = \langle L_n(f) + L_o(f) \rangle = \langle G_0(f) - R_1(f) - 20 \lg(h_0(f)) \rangle, \quad (4)$$

Для выполнения этого проверим, с помощью классического статистического критерия Пирсона, чтобы $L(f)$ было нормально распределено. Отметим, что для корректной работы критерия необходимо наличие >30 членов в выборке. Также, чтобы допущение №3 выполнялось гарантированно, исключим из выборки частоты, близкие критической частоте слоя $E, f > 0.8 f_{oE}$

4.2 Алгоритм расчета поглощения методом амплитудного фактора

Начнем с обработки ионограммы. Оператор на станции (или программа автоматической обработки) согласно инструкции [47] регистрирует параметры ионограммы вертикального радиозондирования. Частоты, высоты, треки слоёв. Все эти данные будут использованы впоследствии, однако на первом шаге алгоритма необходимо выделить однозначную амплитудно–высотно–частотную характеристику (АВЧХ) ионограммы для последующих действий.

Выделение АВЧХ ионограммы.

Известно, что автоматическая обработка ионограммы в общем случае нетривиальная задача. Однако, для случая спокойных ионосферных условий, для ионограммы классического вида, в отсутствие артефактов в исследуемой области, автор собрал некоторый набор очевидных наблюдений в алгоритм выделения АВЧХ ионограммы ВЗ. Тем более это удобно, что ионограммы, не отвечающие спокойным условиям считаются не годными для исследования вариаций поглощения.

Имея набор критических частот и минимальную частоту отражений f_{min} выделяем частотный диапазон слоя E. Анализируем на каждой частоте временной т.е. высотный ряд амплитуд.

Для выделения трека слоя E находим локальный максимум амплитуды выше 95 ниже 120 км, и от этого максимума двигаемся вниз до уменьшения амплитуды на 0.707. Таким образом получаем ВЧХ в удобном, одномерном виде зависимости частоты от высоты. В соответствие этим точкам на ВЧХ приводим значения амплитуд максимумов. В окрестности критической частоты такой метод, возможно, даст ошибки определения АВЧХ, однако это не существенно, т.к. для исследования неотклоняющего поглощения необходимо отказываться от части данных в области с частотами больше $0,8 f_{oE}$ и меньше f_{oE} где существенный вклад вносит поглощение отклоняющее.

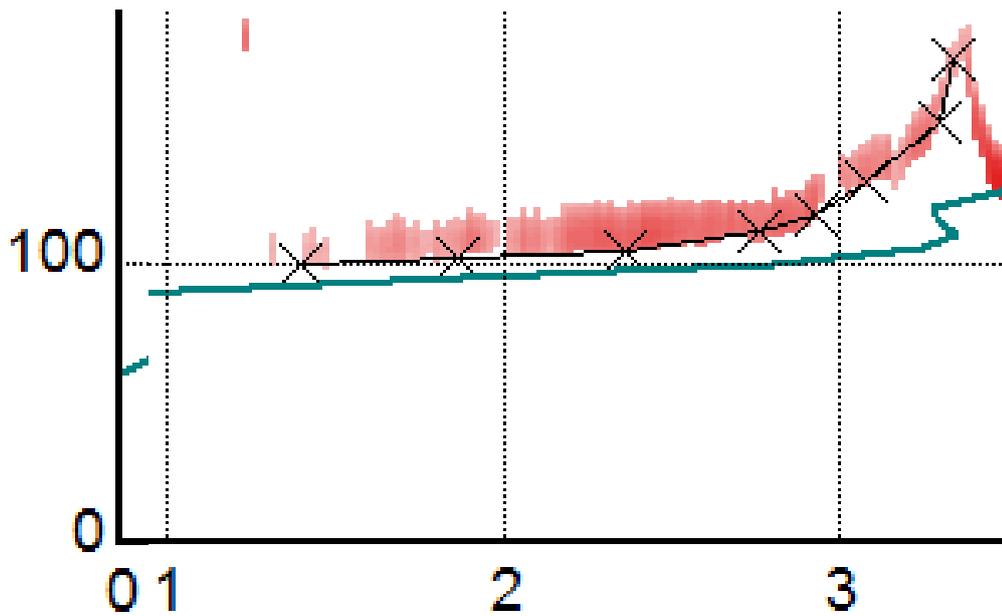


Рис. 13 Отражения слоя E - красные вертикальные полосы. Черная сплошная линия – обработка оператора на станции. Абсцисса - частота в МГц, ордината действующая дальность в км.

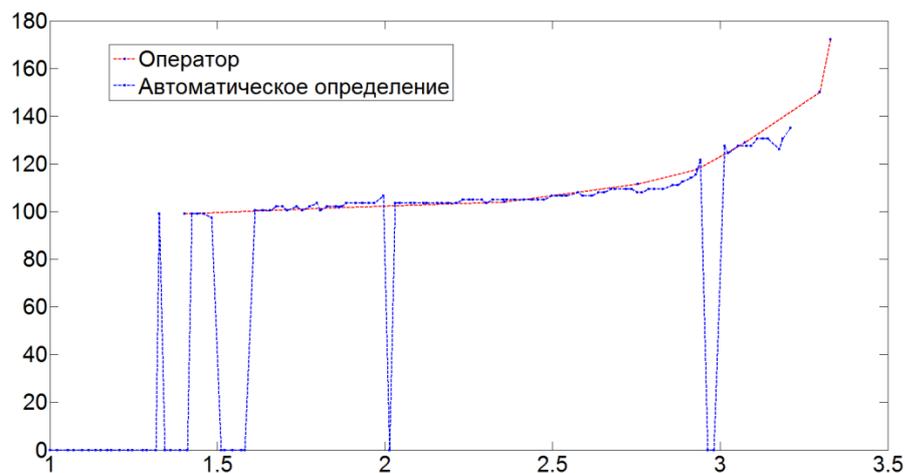


Рис. 14 Сравнение результатов обработки трека слоя E. Абсцисса - частота в МГц, ордината в км действующей дальности.

Для получения АВЧХ слоя F производить выделение отражений слоя труднее. Так, необходимо избавиться от слоя E и его кратных отражений, отражений Es и его кратных отражений, а также не принимать во внимание собственные кратные отражения. Слой E его и кратные отражения несложно отделяются по частоте

<FoE, а вот слой Es и его кратные отражения создают реальные трудности алгоритму.

Для его устранения, на каждой частоте, после определения максимума в диапазоне возможных высот появления слоя F в это локальное время года, «выбрасываются» данные в два раза выше высоты отражения.

Расчет зависимости аппаратуры от частоты

В качестве постоянной аппаратуры (будем использовать её исторический максимум. Для этого:

- 1) По данным одной ионограммы внутри частотного диапазона следа одного ионосферного слоя по формуле (1). Рассчитывается ряд величин G_0 на каждой частоте f
- 2) Прodelываем такую же операцию для всего доступного архива ионограмм по этой станции с разделением магнитоионных компонент. Получаем ряд $G_0(f, I)$, где I – номер ионограммы.
- 3) Анализируем для фиксированной f ряд, очищаем его от выбросов, выстраивая значения по убыванию, выбираем максимальное, трижды повторяющееся значение с разбросом $dL=1$ дБ.

Таким образом обрабатывается весь доступный массив ионограмм этой ионосферной станции. После этапа удаления статистических выбросов, находим функцию аппаратуры:

$$G_0(f) = \max_{t \rightarrow \infty} [G_0(f)_t];$$

Алгоритм расчета амплитудного фактора ионограммы ВЗ

В рассматриваемом случае алгоритм оценки величины поглощения радиоволн состоит из следующих шагов (рис. 15):

- 1) Данные обработки оператора на станции, техническая информация об ионограмме, АВЧХ извлекаются из БД.
- 2) Производится автоматическая обработка АВЧХ ионограммы описанным выше способом, возвращаются массивы R_I и h' на каждой частоте.
- 3) Внутри частотного диапазона следа одного ионосферного слоя по формулам (1 - 4). Рассчитывается ряд величин L на каждой частоте f , и исследуется его закон распределения. Пример зависимости поглощения от частоты приведен на рис. 16.
- 4) Целью ставится нахождение оптимального частотного диапазона, в котором лучшим образом выполняется предположение о нормальном законе распределения. Выбираем начальные приближения:

$$f_{center} = \frac{f_{min} + f_{oE}}{2}, \quad df = \frac{f_{oE} - f_{min}}{2}.$$

Методом Нельдера-Мида решаем задачу нахождения максимума выражения:

$$\max \left[\frac{\chi^2(f_{center}, df)}{\chi_{n, \alpha}^2} \right],$$

где χ_{norm}^2 - табличное значение критерия Пирсона, определяется для заданного числа степеней свободы n и α , $\chi^2(f_{center}, df)$ - рассчитывается на основе анализа выборки ряда $L(f)$ в диапазоне $[f_{center} - df, f_{center} + df]$ при условии кол-ва членов ряда > 30 ;

Расчет χ^2 происходит традиционным образом. Рассчитываются величины статистики $L(f)$: σ - дисперсия и μ - центральный момент. После этого формируется дискретная функция плотности вероятности $W_L(\sigma, \mu)$, используя ближайшее целое число столбцов:

$$k = [5 \cdot \log_{10}(b)],$$

где b – кол-во членов в ряде $L(f)$. Плотность вероятности для нормального закона распределения $W_{norm}(b)$ рассчитывается в тех же классах, в которых определена W_L , и формируется значение критерия:

$$\chi_{(f_{center}, df)}^2 = \sum_k \left[\frac{(W_L - W_{norm})^2}{W_{norm}} \right]$$

$\chi_{(n, \alpha)}^2$ определяется числом степеней свободы, для нормального распределения $n=b-3$, и для заданного уровня значимости α . В `mat` этого значения встроенная в `matlab` функция определения квантильного значения. после этого пункта имеем оптимальный диапазон, определяемый f_{center} , `df`.

5) Если для заданного уровня значимости α выполняется неравенство

$$\chi_{(n, \alpha)}^2 \leq \chi_{f_{center}, df}^2,$$

принимая гипотезу о нормальном распределении, получаем параметры распределения – среднее и дисперсию; Поглощение, рассчитанное методом амплитудного фактора считаем равным среднему статистическому, эквивалентную «рабочую» частоту, полагаем равной f_{center} .

Если же неравенство не выполняется – считаем, что оценка поглощения методом амплитудного фактора по данной ионограмме невозможна.

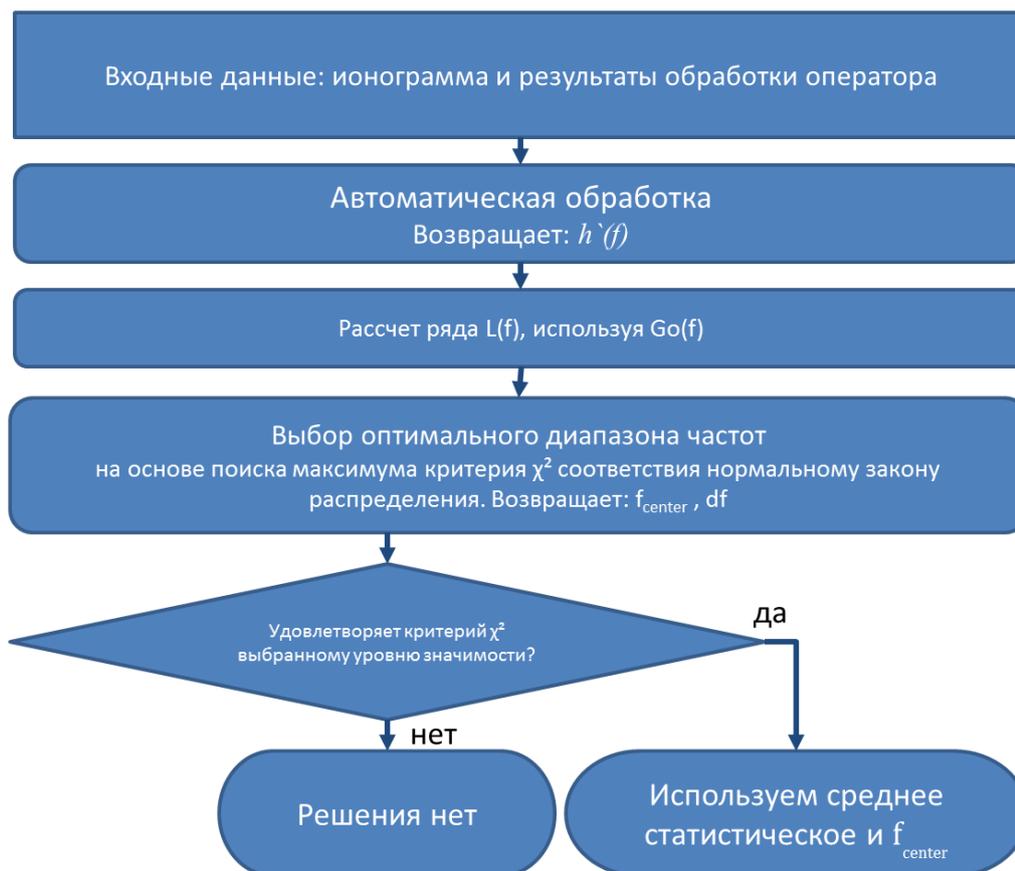


Рис. 15 Блок- схема алгоритма расчета поглощения методом амплитудного фактора.

Для слоя F алгоритм дополняется промежуточным действием, следующим за пунктом 1), заключающимся в выборе оптимального $f_{раб}$ и частотного диапазона, вокруг этого $f_{раб}$, условия выбора – максимальное для заданного уровня значимости соответствие критерию χ^2 . Устраняя таким образом избыточность данных отражений слоя F мы выбираем наиболее удачные $f_{раб}$ и ширину частотного окна, локализуем измерения АФ по частоте.

Получаемые настоящим методом среднее частотного ряда оценок величины ионосферного поглощения радиоволн, будем называть «амплитудным фактором». Попробуем соотнести величины поглощения,

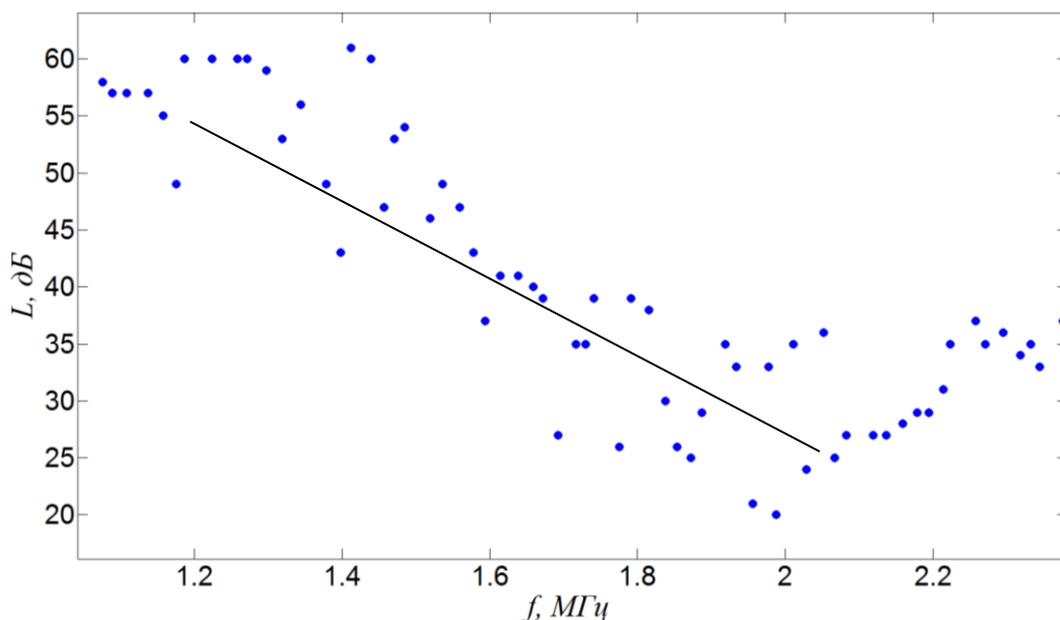


Рис.

16 Пример зависимости поглощения L от частоты f , полученной по данным одной ионограммы ВЗ.

определяемые на фиксированных частотах, с которыми имеют дело в классическом варианте метода А1, и значения «амплитудного фактора», особенностью которого является принципиальная изменчивость эквивалентной рабочей частоты с течением времени, от ионограммы к ионограмме, для этого воспользуемся алгоритмом перехода к фиксированной частоте.

Погрешности

Рассчитаем систематическую ошибку метода, связанную с дискретностью данных ионозонда «Парус-А». Абсолютную погрешность примем равной половине величины последнего разряда – 0.75 км по высоте, 0.5 дБ по амплитуде эхосигналов.

Абсолютная погрешность расчета постоянной аппаратуры определяется из выражения (1):

$$\Delta G_0 = 2\Delta R_1 + 20 \frac{\Delta h_0}{h_0};$$

$h_0 \geq 90$ км, для отражений слоя E;

$$\Delta G_0 = 1 + 20 \frac{0.75}{90} \simeq$$

Можем оценить сверху абсолютную погрешность расчета поглощения из выражения (4):

$$\Delta L = \Delta G_0 + \Delta R_1 + 20 \frac{\Delta h_0}{h_0};$$

$h_0 \geq 90$ км, для отражений слоя E;

$$\Delta L = 1.2 + 0.5 + 20 \frac{0.75}{90} \simeq$$

Итого, для предлагаемого метода систематическая ошибка единичного измерения по отражениям слоя E оказывается меньше 2.1 дБ, а для слоя F, с существенно большими высотами отражения, около 2 дБ.

4.3 Алгоритм перехода к фиксированной частоте

Исторически для вариации ионосферного поглощения строились на фиксированных частотах, т.к. метод А1 подразумевал использование фиксированных частот зондирования. В практике применения данных [41] поглощения использовали эмпирические формулы перехода от одной несущей частоты к другой, некоторые соображения к этому приведены в п.1.2. Данные метода А1 при расчете энергетике радиотрасс приводятся к частоте передачи, воспользуемся аналогичным алгоритмом для приведения величины АФ к частоте $f_{\text{раб}} = 2,5$ МГц :

$$L(f_{\text{раб}}) = L(f) \left(\frac{f + f_L}{f_{\text{раб}} + f_L} \right)^m,$$

где $f_{\text{раб}}$ – гирочастота электронов над ионосферной станцией, f – текущая частота, на которой был определен амплитудный фактор, m – эмпирический коэффициент.

4.4 Метод расчета профиля электронной концентрации по данным одной ионограммы ВЗ

Задача учета не имеющей отражений на ионограмме ионизации с плазменными частотами меньше f_{min} , как было описано в п. 1.?, имеет решение в классе аналитических функций уже при наличии одного, дополнительного к получаемым из ионограммы $h'(f)$, параметра. В качестве одного предлагается использовать полученное по этой же ионограмме методом амплитудного фактора. описанным в п. 4.1 значение поглощения.

Начиная с классических работ в области ионосферных радиоволн[1,2], предлагалось использовать различные аналитические функции в качестве моделей высотных профилей электронной концентрации $N(h)$ в D-области. В качестве первого допущения будем искать профиль вида:

$$N(h) = N_{60} e^{a(h-60)},$$

где N_{60} – значение электронной концентрации на высоте 60 км. a – некоторая величина.

Исходя из оптического приближения для коэффициента поглощения, запишем:

$$\rho = \exp \left\{ -2 \frac{\omega}{c} \int_{h_0}^{h_{g=0}} \chi dh \right\}$$

Согласно элементарной магнитоионной теории в отсутствии магнитного поля:

$$\chi = \frac{1}{2m_e \omega} \frac{4\pi e^2 N \nu}{\mu(\omega^2 + \nu^2)}$$

Для действующей высоты:

$$h' = \int_{h_0}^{h_{\varepsilon=0}} \mu' dh,$$

где $\mu' = \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{f_{раб}^2}{f_{плазм}^2}}}$.

Выражение для плазменной частоты на высоте отражения:

$$N(h_{\varepsilon=0}) = 1.24 \cdot 10^4 f_{раб}^2,$$

где $f_{раб}$ – рабочая частота в МГц.

Для расчета энергетических характеристик радиотрасс, в частности ионосферного поглощения радиоволн, в дополнение к модели профиля электронной концентрации необходимо знание высотного профиля эффективной частоты соударений $\nu(h)$.

В условиях прикладных задач распространения декаметровых радиоволн используется неизменный вдоль трассы распространения радиоволн высотный профиль эффективных частот соударений, близкий к газокинетическому [73]:

$$\nu(h) = e^{12.8076 - 0.158h} + e^{-6.175 - 0.0042 \cdot h},$$

где $\nu(h)$ в МГц, h - высота в км.

Для упрощения будем считать, что $\nu(h)$ не зависит от частоты $f_{раб}$. Результаты метода АФ будем использовать для проверки годности модельного профиля. Для заданной рабочей частоты будем строить ряд моделей профилей в пространстве N_{60} и α :

Находим аналитически h' :

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

где $h_{\varepsilon=0} = 60 + \frac{\ln\left(\frac{1.24 \cdot 10^4 f_{min}^2}{N_{60}}\right)}{\alpha}$, - высота точки отражения, $h_0 = 60$ км.

Поглощение считаем численно:

$$\begin{aligned} L = -\lg(\rho(N_{60}, \alpha)) &= 2 \frac{\omega}{c} \int_{h_0}^{h_{\varepsilon=0}} \frac{1}{2m_e \omega} \frac{4\pi e^2 N \nu}{\mu(\omega^2 + \nu^2)} \partial h = \\ &= -\lg(\rho(N_{60}, \alpha)) = \frac{2\pi e^2}{m_e c} \int_{h_0}^{h_{\varepsilon=0}} \frac{N(h)\nu(h)}{\mu(h)(\omega^2 + \nu(h)^2)} \partial h = \\ &= A \frac{h_{\varepsilon=0} - h_0}{n} \left\{ \frac{J(h_0) + J(h_{\varepsilon=0})}{2} + \sum_{h_0=1}^{h_{\varepsilon=0}-1} J(h) \right\}, \end{aligned}$$

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

4.5 Алгоритм расчета профиля электронной концентрации по данным одной ионограммы ВЗ до foE

Входные параметры: ряд ВЧХ слоя E, величина АФ, рабочая частота АФ.

Выходные параметры: профиль электронной концентрации от 60 км до h_{maxE} – максимума слоя E.

Общий подход [22, 50] к построению Nh профиля D области заключается в использовании на плазменных частотах меньше f_{min} экспоненциальной зависимости, с переменными N_{60} и a , выше f_{min} – профиля обращения ВЧХ методом Титериджа [74]. Будем минимизировать сумму квадратов невязок поглощения АФ $L_{A\Phi}$ и действующей высоты на частоте f_{min} :

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

Алгоритм расчета:

1. Задаются начальные приближения N_{60} и α , рассчитывается профиль до f_{min} , при этом истинная высота h_{fmin} рассчитывается из экспоненциального профиля:

$$N(h) = N_{60} e^{\alpha(h-60)},$$

2. Методом Титриджа, на основе данных ($h'_i(f)$) обработки ионограммы оператором на станции, рассчитывается профиль до foE .

3. Рассчитываем интеграл поглощения на частоте $f_{раб}$ по формулам

4. Рассчитываем h'_{fmin} по формуле

5. Сравниваем с наблюдениями и считаем невязку

Для минимизации невязки использовался алгоритм Нельдера-Мида, реализация которого подразумевает нахождение локального минимума. Покажем графически что найденный минимум невязки – глобальный. Из рисунка 17 следует, что минимум величины невязки $\Delta(N_{60}, \alpha)$ в диапазоне возможных значений параметров – единственный.

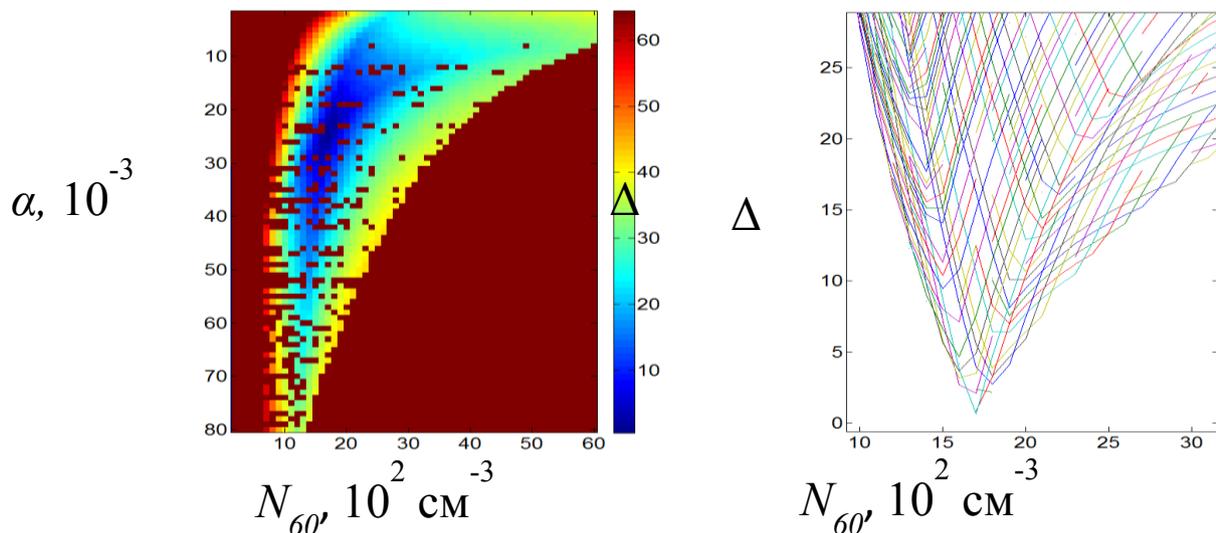


Рис.17 Величина функции невязки $\Delta(N_{60}, \alpha)$, справа - зависимость Δ от параметра N_{60} , линии выстроены для фиксированных значений α .

Выводы по главе 4

Создан метод расчета поглощения радиоволн по данным одной ионограммы вертикального зондирования цифрового ионозонда «Парус-А», метод расчета профиля электронной концентрации в нижней ионосфере по данным ионосферного поглощения радиоволн, определенных методом амплитудного фактора и ВЧХ ионограммы ВЗ.

Разработана реализация указанных методов, а также необходимых модулей программного обеспечения подготовки данных ионограмм, на языке Matlab. Выбран алгоритм перехода к фиксированной частоте.

5 Вариации поглощения по данным ионозонда «Парус-А»

5.1 Практика работы с результатами метода АФ

В целях проверки алгоритма и анализа всех возможных вариаций ионосферного поглощения радиоволн обработан весь доступный фактический материал. Он включает все ионограммы вертикального зондирования ионозонда «Парус-А», с разделением магнитоионных компонент по принципу поляризации, зарегистрированные с интервалом между соседними 15 минут, в период с 1.6.2011 по 1.10.2016 так или иначе вошли в результаты исследования. Работа была поставлена следующим образом: сначала на опытном периоде лето – осень – зима 2014 года отрабатывались алгоритмы, после производился анализ всего массива ионограмм.

В последующих параграфах мы перейдем к поглощению на фиксированных частотах, с целью корректного сравнения с известными вариациям поглощения, т.к. они описываются как зависимости поглощения от времени.

В связи с существенной вариативностью величины ионосферного поглощения радиоволн, исследовались усредненные данные, за исключением специально выделенных дат солнечных / геофизических событий, а также для наглядной демонстрации синхронности появления эффектов.

Будем исследовать разработанный в главе 4 метод, последовательно проверяя его результаты на соответствие всем требованиям, сформулированным в главах 2 и 3.

На рисунке 17 зеленой кривой показана вариация величины поглощения на фиксированной частоте. Красным пунктиром показан суточный ход величины поглощения, если эквивалентные рабочие частоты выбраны равными полусумме частот f_{oE} – критической частоты слоя E и f_{min} – минимальной, на которой регистрируются радиоэхо ионосферы. Обозначены проекции. На проекции в

координатах локальное время- величина поглощения показан вероятная суточная вариация величины

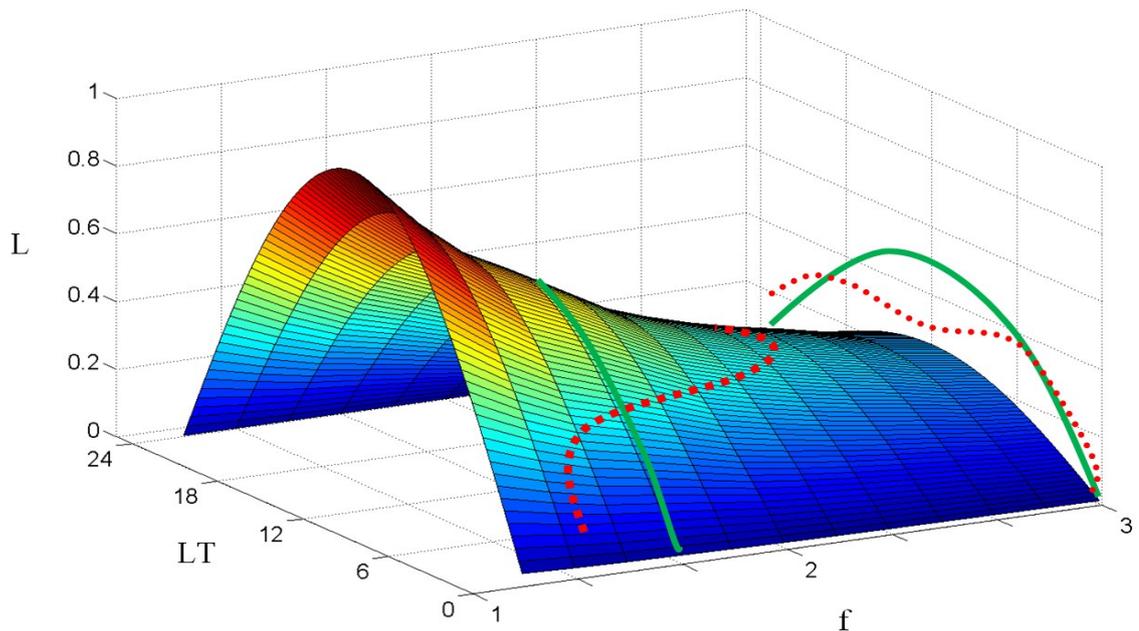


Рис. 17 Идеализированная картина суточного хода нормированного поглощения на частотах 1-3 МГц.[10] Суточный ход на фиксированной частоте – зеленая линия. Суточное изменение поглощения на частоте, равной полусумме f_{0E} и f_{min} представлено красным пунктиром.

На рисунке 18 показаны суточные вариации поглощения определенным методом АФ по данным московской ионосферной станции, по отражениям слоя E. Выделено три характерных периода: июль-август, сентябрь-октябрь и ноябрь-декабрь 2014. Для выявления сезонных вариаций, первый условно будем называть «Лето», второй «осень», третий «зима». На рисунке 18 а показан в координатах величина поглощения – эквивалентная рабочая частота – локальное время, на рисунках 18 б, в, г – проекции на плоскости величина поглощения – эквивалентная рабочая частота, эквивалентная рабочая частота – локальное время, величина поглощения – локальное время соответственно. Выделены красным точки – «зима», синим – «осень», коричневым – «лето»

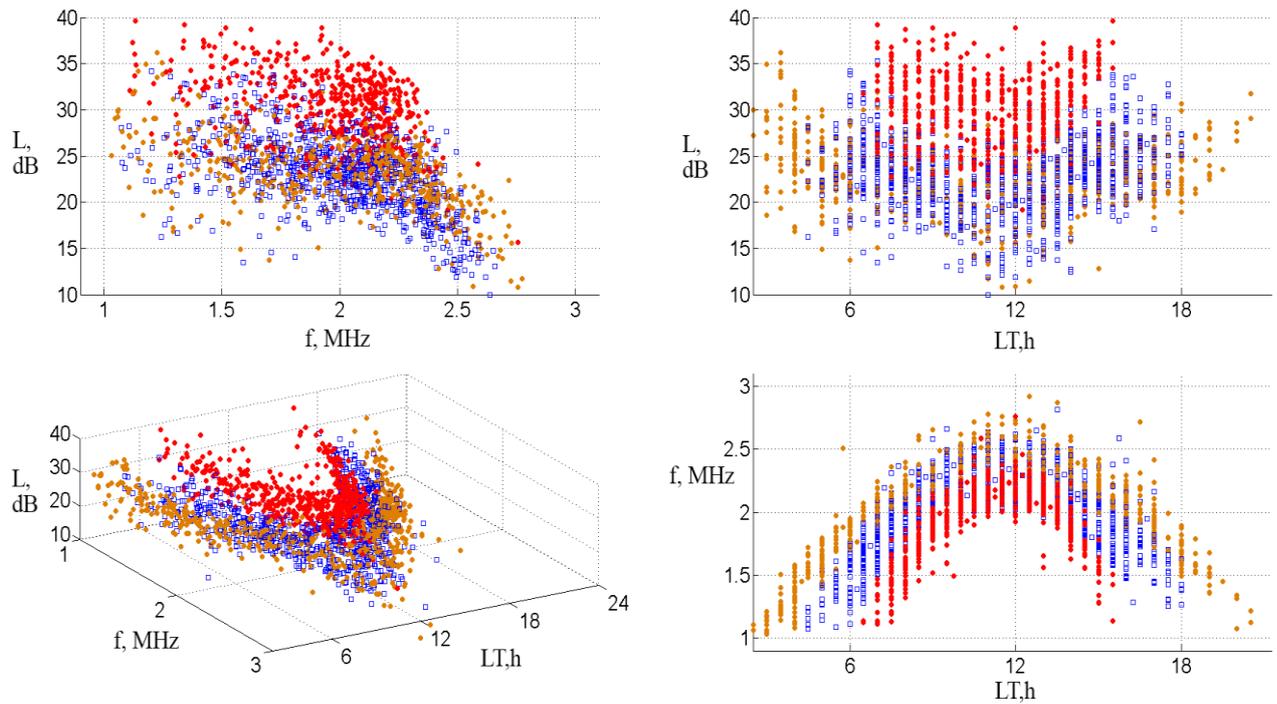


Рис. 18 Вариации величины поглощения, определенного методом амплитудного фактора [12] в координатах: *а*- поглощения, локального времени и рабочей частоты; *б* – поглощения и рабочей частоты; *в* – поглощения и локального времени; *г* – рабочей частоты и локального времени. Красные точки – зимние месяцы, синие – осенние, коричневые – летние.

Видно, что в суточных вариациях эквивалентной рабочей частоты, а также величинах поглощения (рис 18, *в,г*) однозначно выделяются области «лета», «зимы» и «осени» между ними. Соблюдается характерная обратная зависимость величины поглощения от частоты зондирования (рис 18, *б*).

Необходимо дополнить, что все значения поглощения определенные методом АФ определяются относительно постоянной аппаратуры, данные которой постоянно уточняются, уточняя таким образом уровень «0 дБ» для величины амплитуды излученной ионозондом зондирующей радиоволны на текущей частоте.

По данным первого тестового периода была построена гистограмма распределения среднеквадратичных ошибок определения АФ (рис. 19). Из

анализа погрешностей приведенного в п. 4.3, систематической ошибки единичного измерения поглощения для отражений слоя E будет меньше 2.1 дБ, что, как правило, меньше среднеквадратичного отклонения входящих в окно усреднения (SD) (7 дБ). Следовательно, уменьшить погрешность можно увеличивая количество членов ряда $L(f)$, входящих в среднее, например, путем уменьшения дискрета частоты при регистрации ионограммы, или увеличения количества импульсов двух- и более кратной регистрации ионограммы.

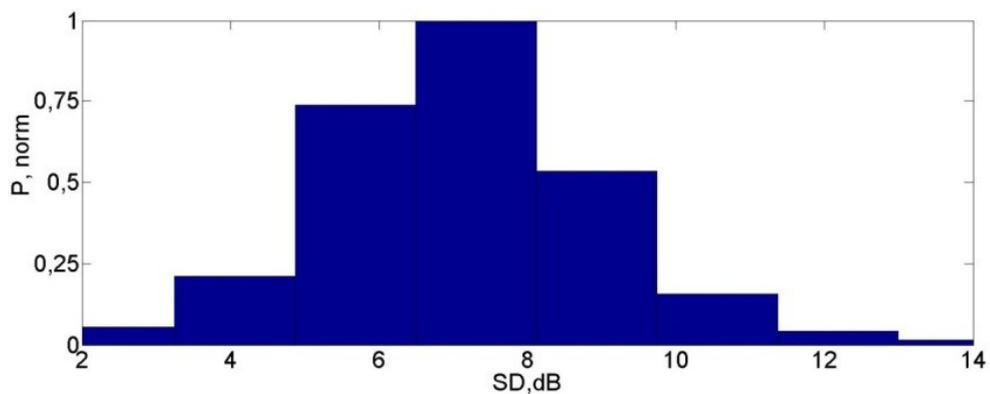


Рис. 19 Нормированная функция распределения среднеквадратичных отклонений $L(f)$, Июнь 2013.

Первоначально были получены ряды “предварительных данных” без коррекции постоянной аппаратуры. Функция постоянной аппаратуры для конкретной ионосферной станции в зависимости от частоты $G_0(f)$ определялась алгоритмом описанным в п. на основании данных за весь период и постоянно уточнялась. На текущий момент функция постоянной аппаратуры от частоты московской ионосферной станции выглядит следующим образом (рис.20).

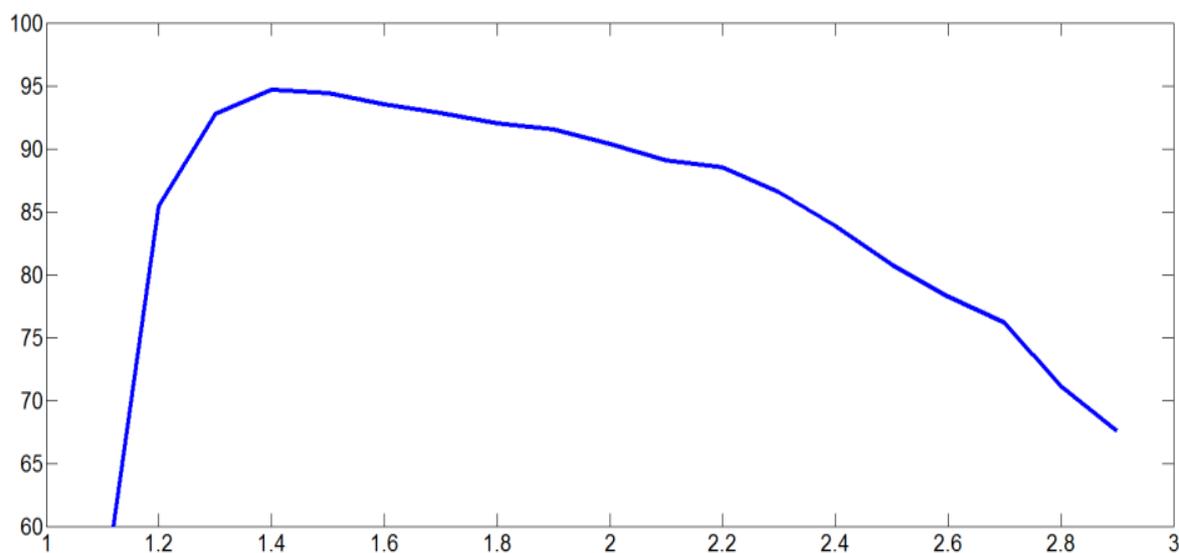


Рис. 20

Актуальная на 10.10.2016 зависимость $G_0(f)$ ионозонда “Парус-А” московской ионосферной станции.

5.2 Данные московской ионосферной станции (ИЗМИРАН)

Охвачен период с 1.6.2011 по 1.10.2016. Всего получено 27 тыс. значений поглощения методом АФ на станции ИЗМИРАН, что составляет 31,2% обработанных оператором ионограмм этой станции. На рис. 21 представлены гистограммы распределения успешно зарегистрированных величин поглощения методом АФ, в зависимости от времени года, года, угла возвышения Солнца и F10,7.

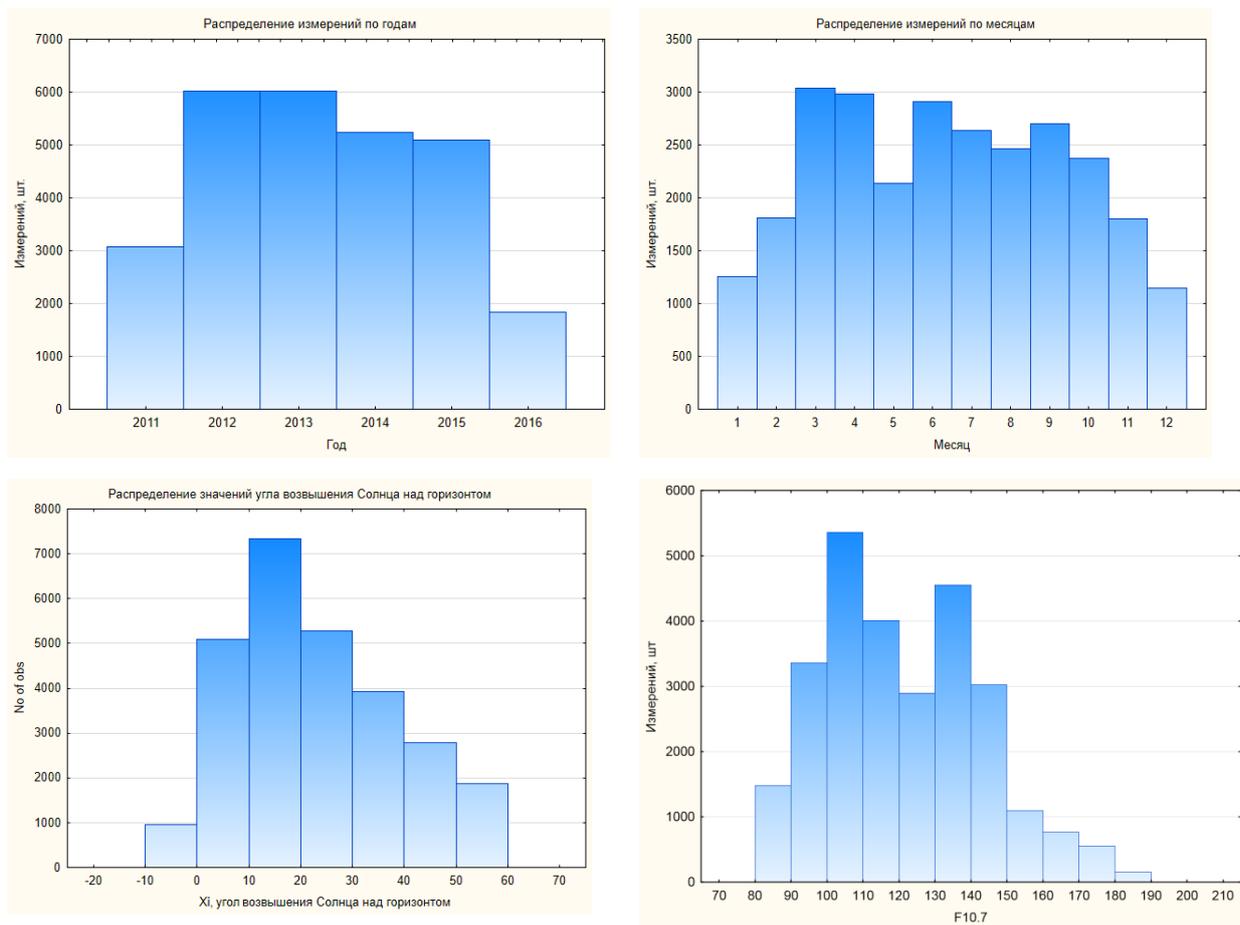


Рис. 21 Распределение наблюдений по периодам, углу возвышения Солнца и индексу F10.7 данных московской ионосферной станции.

5.3 Данные ионосферной станции Ростов-на-Дону

Охвачен период с 1.1.2014 по 1.10.2016. Всего получено 3,7 тыс. значений поглощения методом амплитудного фактора на станции в г. Ростов-на-Дону, что составляет 18,1% обработанных оператором ионограмм этой станции. На рис. 22 представлены гистограммы распределения успешно зарегистрированных величин поглощения методом АФ, в зависимости от времени года, года, угла возвышения Солнца и F10,7.

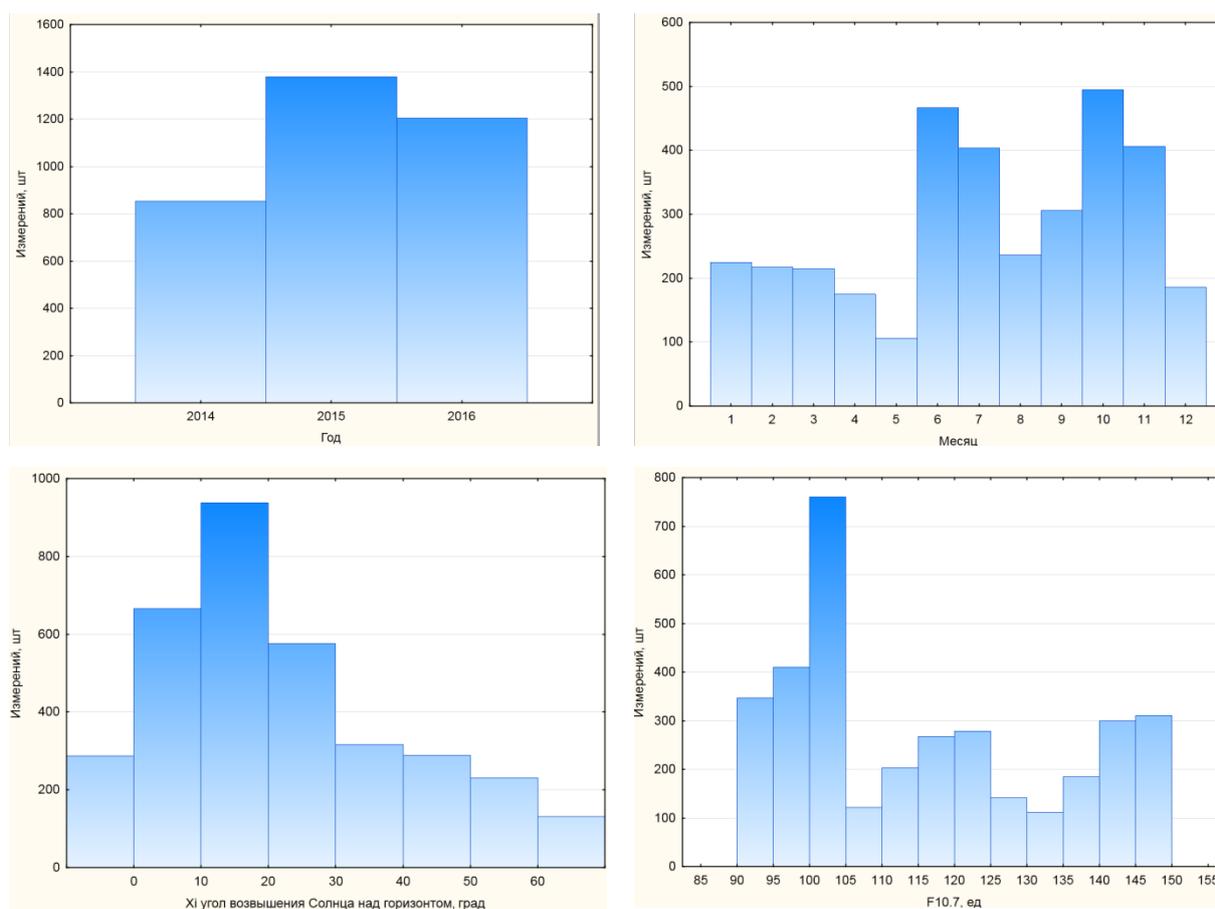


Рис. 22 Распределение наблюдений по периодам, углу возвышения Солнца и индексу F10.7 данных ионосферной станции в г. Ростов-на-Дону.

5.4 Суточные вариации поглощения радиоволн

Суточные вариации поглощения радиоволн, приведённого к одной и той же стандартной частоте следуют изменениям зенитного угла Солнца, максимум наблюдается в локальный полдень. На рис. 23 показан пример суточных вариаций.

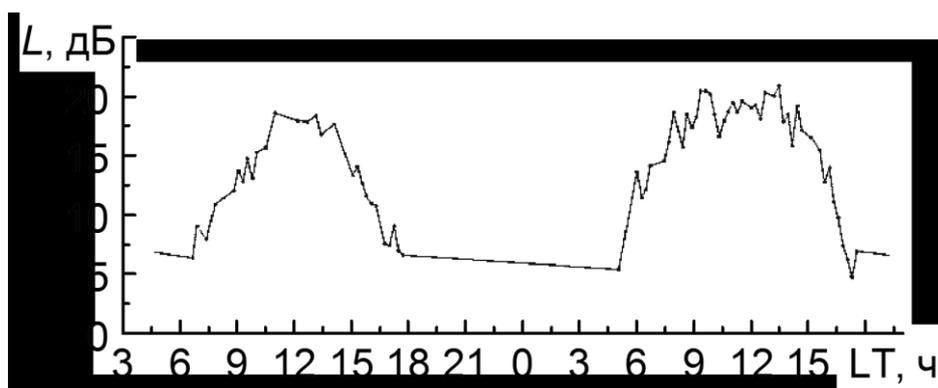


Рис. 23 Пример суточных вариаций поглощения радиоволн, рассчитанных методом амплитудного фактора, приведенного к частоте 2,5МГц. По оси абсцисс местное время.[51]

В сравнении с классическими суточными вариациями поглощения радиоволн, поглощение определенное методом АФ может иметь более динамичную структуру, которая может быть связана с наличием краткосрочной динамики ионизации (вариациями величины поглощения), которое, в случае с результатами А1, нивелировалось при усреднении по существенно большему времени.

Величина f_{min} также является интегральной характеристикой поглощения радиоволн в нижней ионосфере. Для примера на рис. 24 показана (сделать один рис под другим в нормальных координатах) в верхней части величина поглощения АФ, а в нижней f_{min} заметно хорошее совпадение вариаций, а в целом по доступному массиву данных коэффициент корреляции составляет $\sim 0,7$.

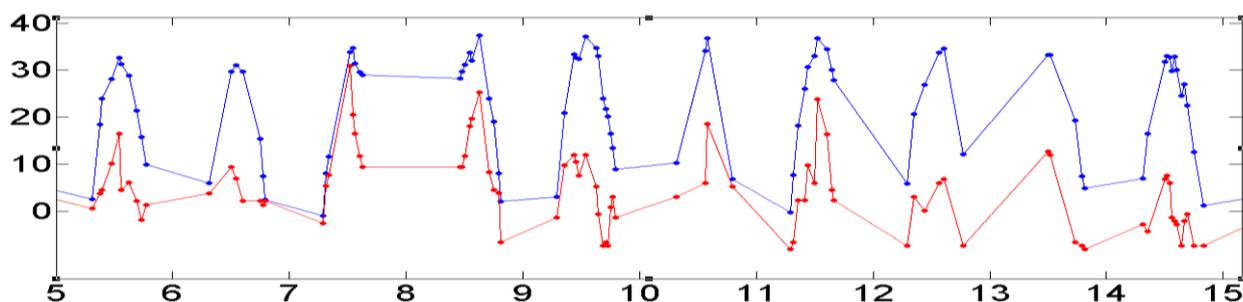
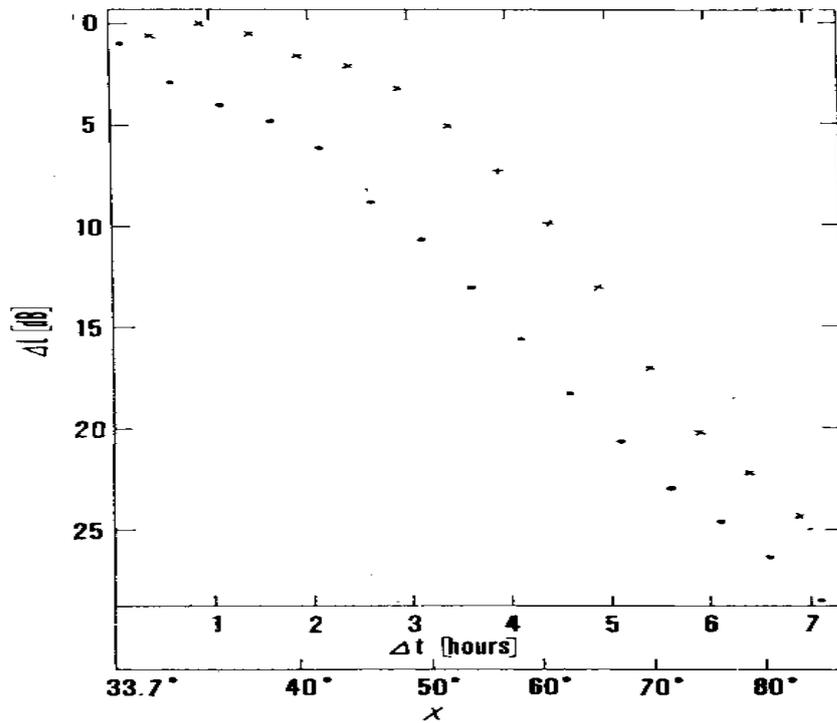


Рис. 24 Часть мая 2015г., как пример вариаций величин поглощения радиоволн, определенных методом АФ, приведенных к одной частоте 2.5 МГц –синяя линия, и функции минимальной частоты ионограммы.

5.5 Асимметрия суточного хода поглощения

Указывается, что суточный ход поглощения имеет асимметрию [68]. При фиксированном угле возвышения Солнца (или что равнозначно, одинаковой разницей между временем измерения и 12LT), после полудня значения поглощения превышают значения до полудня. Более полно явление дневной асимметрии описано в п. 3. для наглядности дублируем рис. 25, показывающую суть явления и таблицу 2, характеризующую наблюдение явления по месяцам и годам. На рис. 26 представлены данные мая, с 1966 по 1973 г., точки на рисунке получены в одинаковое локальное время и усреднены за месяц. Аналогичные вариации, зарегистрированные и усредненные по данным дней июня с 2011 по 2016 г., приведены на рис. 26. Из сравнения рисунков можно сделать вывод о положительной регистрации эффекта.



Mean diurnal variation of absorption in May (1966–1973). $\Delta L = L_{\max} - L$,
 $\Delta t = |t_{\text{noon}} - t|$. Crosses – afternoon values; dots – morning values.

Рис 25. Явление асимметрии суточной вариации поглощения.

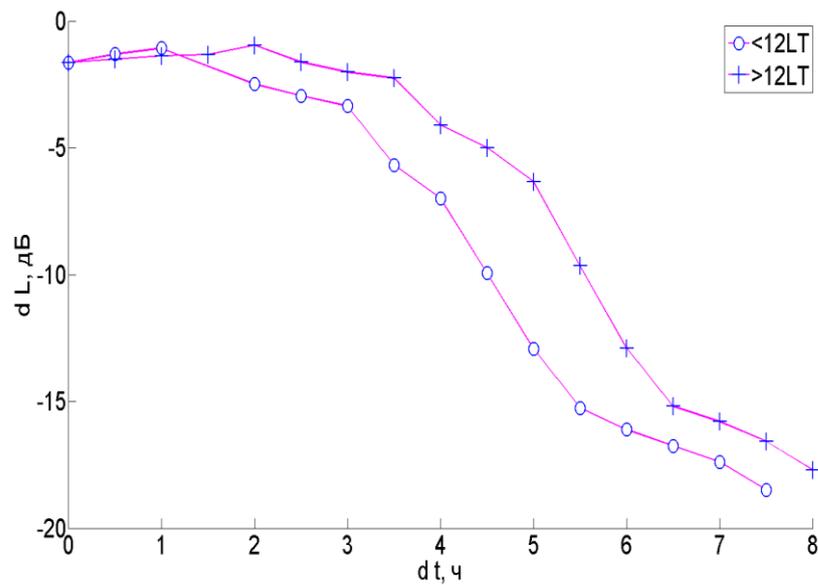


Рис. 26 Среднемесячные (Июнь) отклонения от максимума $dt = \text{abs}(12-t)$, $dL = \max(L) - L$;

Из таблицы 2 следует, что в безусловном большинстве месяцев наблюдался эффект асимметрии суточного хода. Исключения составляют месяцы январь и декабрь. На рисунке 27 представлены средние по месяцам данные суточных вариаций, полученные методом АФ, за доступный период наблюдений. Хорошо видно, что несимметричность суточного хода характера для всех месяцев.

Таблица 2. Несимметричность суточной вариации по [68] «+» означает наличие эффекта, «N» –отсутствие данных, «0» – отсутствие эффекта, «-» - обратный эффект (послеполуденные величины меньше, чем предполуденные).

Table 1. Signs of the diurnal asymmetry of absorption on 2775 kHz. + means higher afternoon absorption; - means higher morning absorption; 0 – rough symmetry; N – no data; 0? – large scatter of values, some of them indicating large +, others large -.

Month	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1960	N	N	N	N	+	+	+	+	+	0	-	0
1961	0	+	+	+	+	0?	+	+	-	-	+	-
1962	-	0	+	+	+	+	+	+	0	0	0	+
1963	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	+	-
1964	-	0	+	+	+	+	+	+	0	+	+	+
1965	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	N	+
1966	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
1967	-	+	+	+	+	+	+	+	+	0	0	0
1968	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
1969	0	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+	0
1970	0	0	+	+	+	+	+	+	N	-	-	0
1971	0	+	N	+	N	N	N	+	+	-	0	+
1972	0	+	+	+	+	+	+	+	+	0	0	+
1973	+	-	0	+	+	N	N	N	N	N	N	N

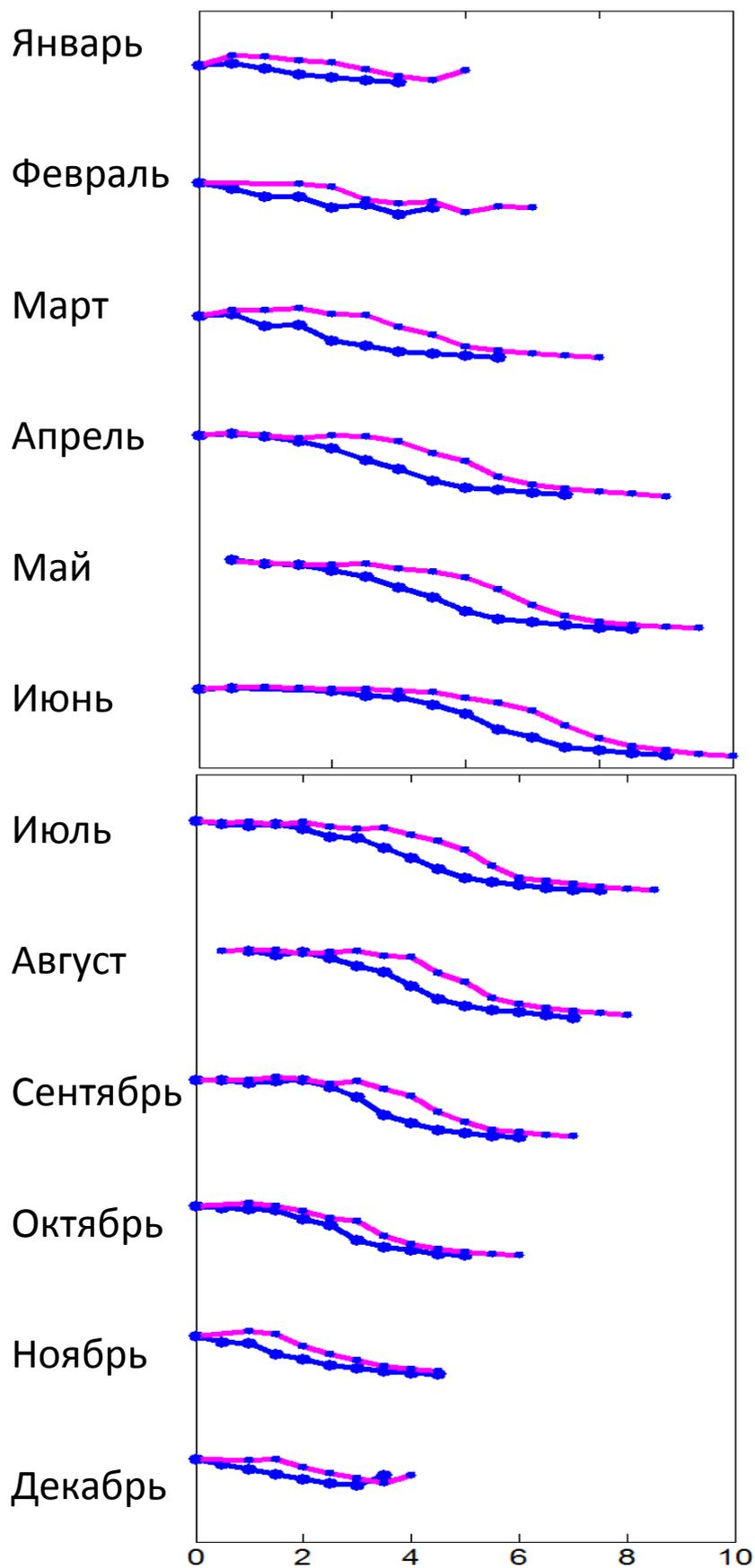


Рис. 27 Распределение асимметрии суточных вариаций поглощения по месяцам за период 6.2011- 10.2016 синяя линия – до полудня, фиолетовая – после.

5.6 Солнечные вспышки

Воспользуемся каталогом вспышечных явлений на Солнце [85], для еще одного этапа проверки. Несмотря на малую скважность (1 раз в 15 минут), попробуем найти продолжительное событие (больше 15 минут). Для регистрации подобного явления необходимо существование зарегистрированной геоэффективной вспышки в локальное дневное время и отсутствие прочих возмущающих факторов. Наиболее часто встречающееся явление в ионосфере, вызванное вспышечной активностью, легко наблюдаемое в данных ВЗ - замирание коротких волн – резкое частичное или полное поглощение ВЧ радиоволн. Ему сопутствует наблюдаемое на ионограмме явление, вызванное повышением ионосферного поглощения - повышение f_{min} ионограммы. Оба этих явления описаны в п. 2.3 и хорошо изучены.

Для поиска такого явления выделим из доступного массива данных поглощения времена с положительным углом возвышения Солнца над горизонтом, условием также станет отсутствие геомагнитных возмущений во время и непосредственно перед вспышкой. Воспользуемся данными потока жесткого рентгена (длина волны от 0.1 до 0.8 нМ) спутниковой группировки GOES, находящейся на геостационарной орбите.

На рисунке 28 показана вспышка класса C3 в 7:47UT 20 февраля 2014 года. В пике она вызвала увеличение f_{min} на 1 МГц (до значения 2.3МГц) и поглощения на 7 дБ.

На рисунке 29 показана вспышка класса M5 22 апреля 2013 года в 13:30LT.. В пике она вызвала увеличение f_{min} на 1,2 МГц (до значения 2.6МГц) и поглощения на 8 дБ.

Рис. 28 . Пример
воздействия вспышки
рентгена класса С3 в
7:47UT 20 февраля 2014
года. Точками обозначены
наблюдаемые значения,
сплошные линии –
среднемесячные.

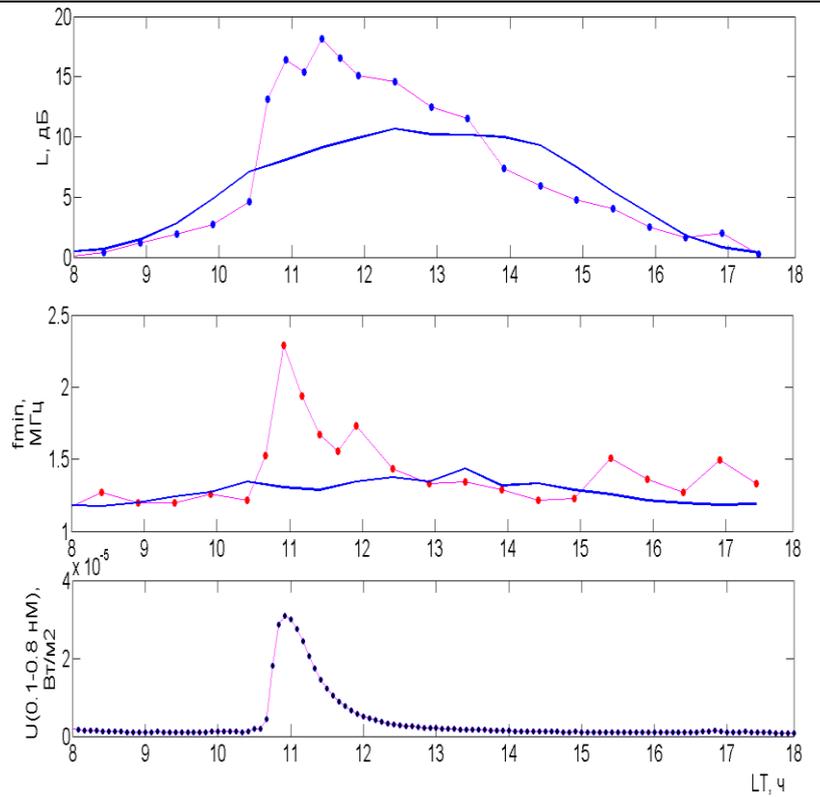
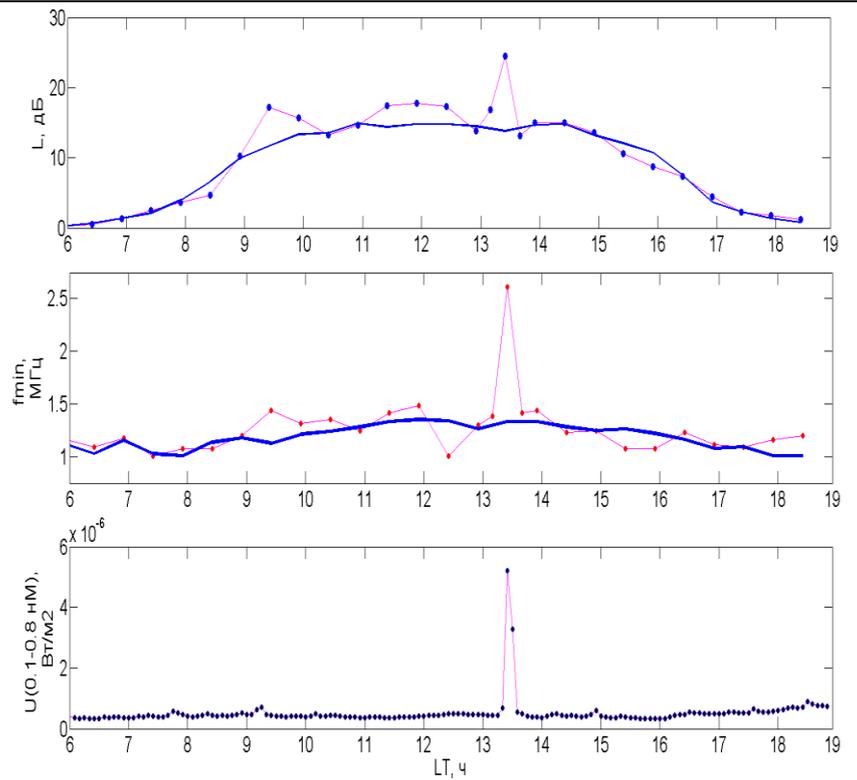


Рис. 29. Пример
воздействия вспышки
рентгена 22 апреля 2013
года в 13:30LT. Точками
обозначены наблюдаемые
значения, сплошные линии
– среднемесячные.



5.7 Регрессионные уравнения для интегральной солнечной активности

Для построения зависимости величины поглощения от интегрального индекса солнечной активности $F_{10,7}$ использованы данные сезонов, когда зимняя аномалия отсутствует, при спокойной геомагнитной обстановке (индекс $A_p < 20$). Для проведения регрессионного анализа, был выбран полиномом первой степени (см. п. 3.2) вида $a(x-b)$. Использовался среднесуточный индекс $F_{10,7}$ [83]. На рисунке 30 показаны зависимость величины поглощения от параметра $F_{10,7}$ при фиксированных углах возвышения Солнца χ_i (5-7; 11-13; 23-25 градусов). Результаты регрессионного анализа представлены в таблице 3.

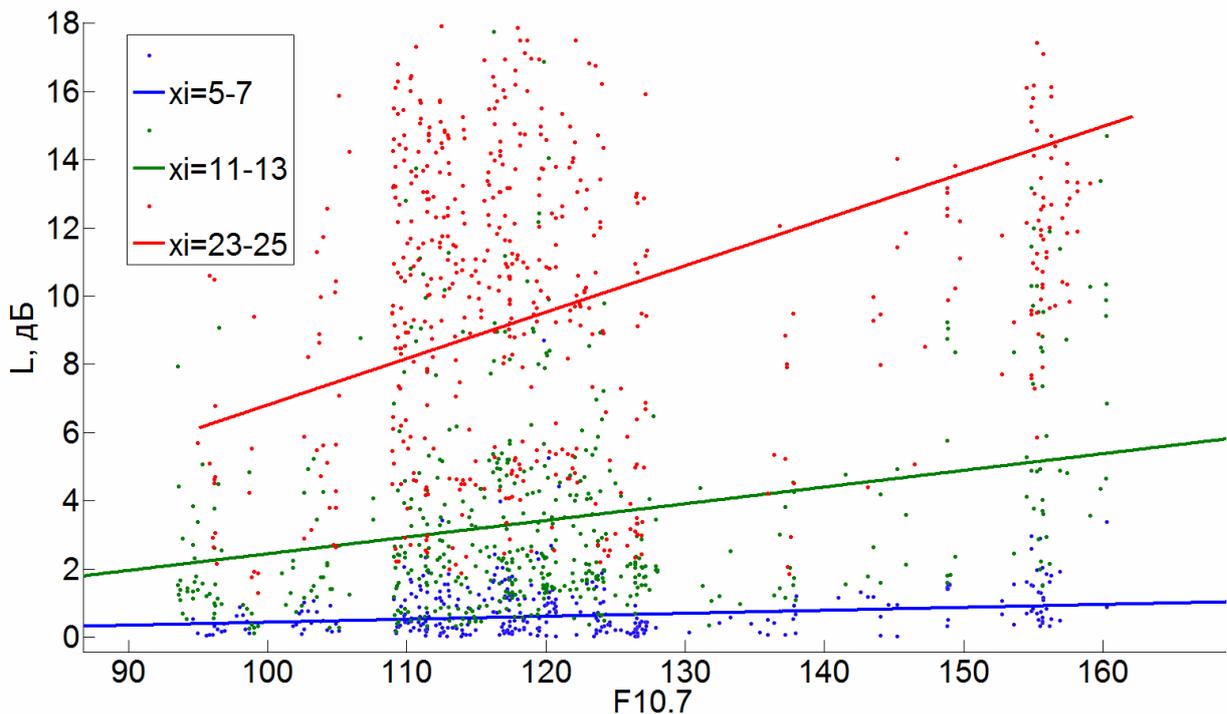


Рис. 30 показаны зависимость величины поглощения от параметра $F_{10,7}$ при фиксированных углах возвышения Солнца χ_i (5-7; 11-13; 23-25 градусов).

Из таблицы 3 следует, что значения критерия R^2 для всех выделенных углов возвышения Солнца показывают несущественность статистических зависимостей, определяемых методом регрессии. В целом, данные свидетельствуют о сложной

зависимости поглощения от потока солнечного излучения на длине волны 10,7 см. На рисунке 30 вертикальные структуры близких значений $F_{10,7}$ обусловлены наличием продолжительных периодов изменения тенденции возрастания/убывания параметра $F_{10,7}$, когда параметр изменяется медленно.

Таблица 3. Параметры регрессионных уравнений зависимости поглощения от $F_{10,7}$ для различных диапазонов углов Солнца.

Диапазон углов возвышения Солнца	5-7	11-13	23-25
a (дБ/(Вт/м ²)) в скобках даны граничные значения для интервалов 95% вероятности	0.008705 (0.00774, 0.009669)	0.0489 (0.0425, 0.05531)	0.1361 (0.1119, 0.1604)
b (град)	50 (42.76, 57.24)	50 (40.8, 59.2)	50 (37.09, 62.91)
сумма квадратов ошибок	290.0388	$4.6732 \cdot 10^3$	$1.1567 \cdot 10^4$
критерий R^2 , квадрат смешанной корреляции	0.14	0.13	0.10
Среднеквадратичная ошибка	0.72	2.89	4.54
Количество точек	561	561	561

5.8 Среднеширотная зимняя аномалия поглощения

Явление зимней аномалии поглощения (ЗАП) описано более полно в соответствующем разделе главы 2. Приведем некоторые результаты, явно утверждающие получение результата, в контексте данной работы дающего возможность рассматривать предлагаемый метод в качестве замены

традиционному А1. На рисунке 31 приведено классическое описание явления ЗАП.

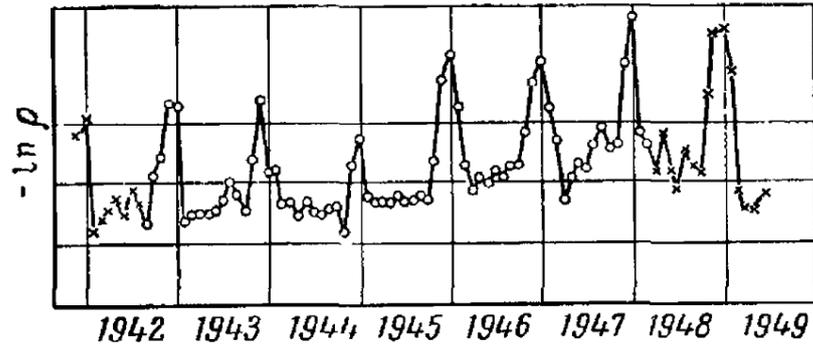


Рис. 31 Литературное описание явления.[3]

На рисунке 32 в тех же координатах поглощение радиоволн /время года показаны результаты метода АФ при фиксированном значении зенитного угла Солнца ($\chi=75^\circ$) были получены данные, поэтому ограничимся качественным соответствием регистрируемого явления описанию.

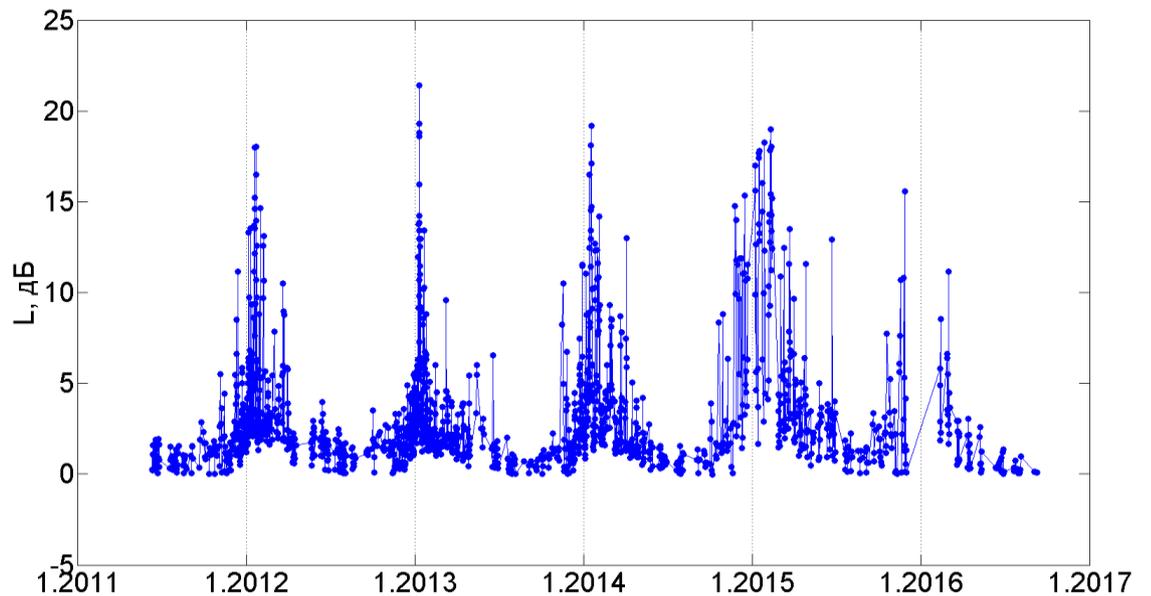


Рис. 32. Сезонные вариации поглощения, зарегистрированные в период с 2011 по 2016 года определенное при значениях зенитного угла Солнца в диапазоне χ от 81 до 79 градусов.

Из рисунка 33, также как из рисунка 32, очевидно колоссальное превышение зимних значений поглощения над летними и межсезонными, что показывает возможность изучения явления ЗАП по данным метода амплитудного фактора.

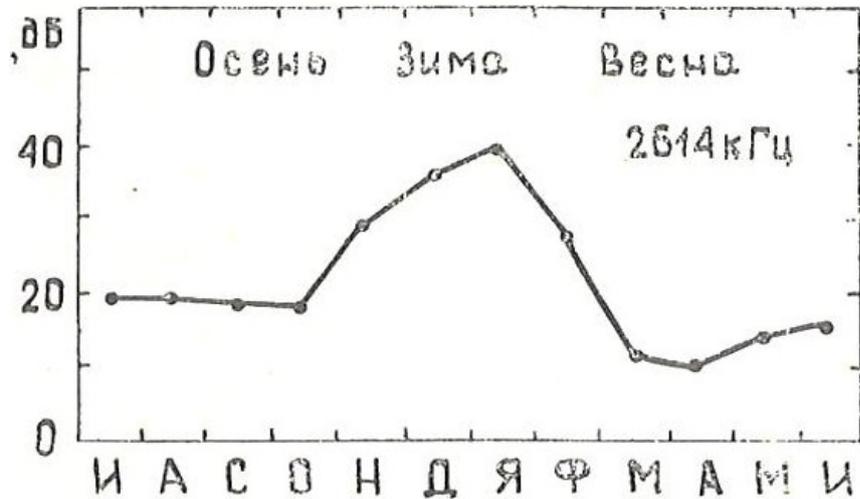


Рис 33. Зимняя аномалия на частоте 2614 КГц по данным [63], Лондон

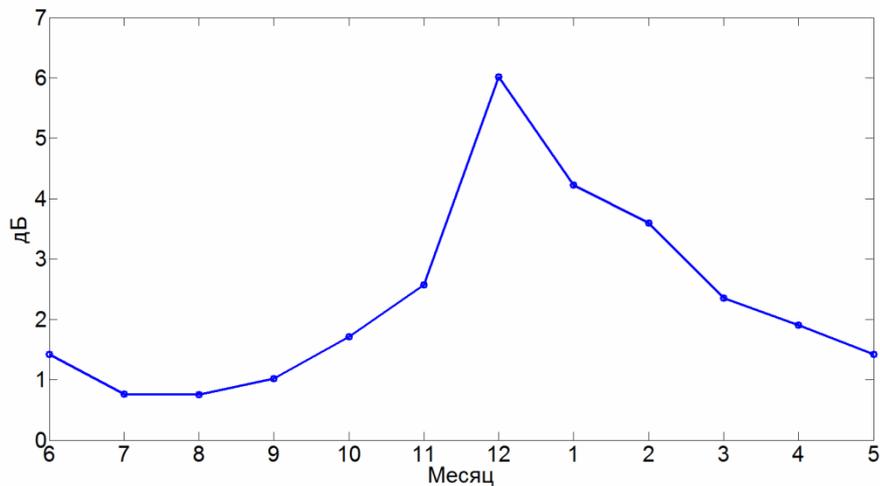


Рис 34. Зимняя аномалия поглощения по данным 2011-2016 года приведенной к частоте 2,5 МГц, определенное при значениях зенитного угла Солнца в диапазоне χ от 81 до 79 градусов.

Из сравнения рисунков 34 и 35 видно, что явление ЗАП наблюдается в данных поглощения определенного методом АФ, однако морфология неодинакова. На рис. 34 заметна асимметрия ЗАП – величины поглощения в ноябре и декабре были выше, чем феврале и марте. В новых данных наблюдается противоположная

асимметричная тенденция; Месяцем с минимальным поглощением был апрель. В новых данных это сентябрь.

Такие различия могут иметь множество причин, например широтный и долготный эффект ЗАП (Лондон 51.5° с. ш. 0.12° в. д., Москва 55.75° с. ш. 37.62° в. д.), различие в геомагнитных широтах, солнечную активность, а также различия в методе наблюдения. В методе АФ исследуется некоторый достаточно широкий частотный диапазон (минимум 30 значений по 25 КГц, итого диапазон $2\Delta f=0,75$ МГц), а как указывается, явление ЗАП сосредоточено в нижней части диапазона КВ. Также [54] указывается, что величина в m степени уравнения используемого для перехода на фиксированные частоты, не постоянна, а имеет в том числе, зависимость от времени года, суток и др.

На рисунке показано различие в величинах поглощения в зависимости от угла возвышения Солнца над горизонтом. Цветом выделены данные характерных месяцев. Для регрессионного анализа были выбран полином третьей ($n=3$) степени вида $a(x-b)^n$ как наиболее отвечающий внешнему виду. Результаты приведены в таблице 4.

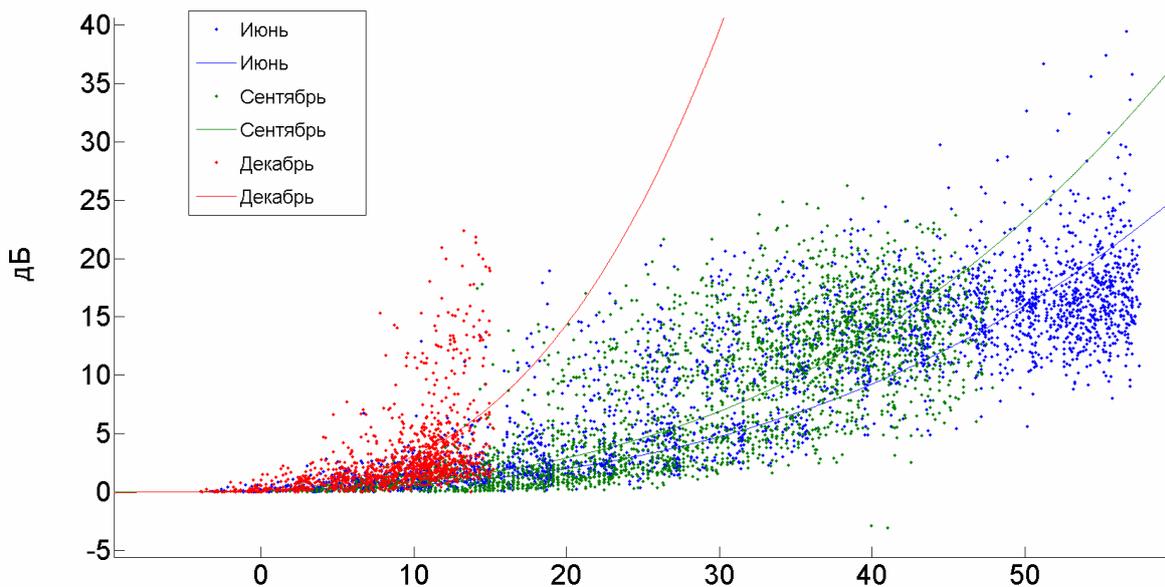


Рис. 35 По оси абсцисс угол возвышения Солнца, по оси ординат поглощение определено методом АФ за период с 2011 по 2016. Для построения

использовались данные соответствующих месяцев. Тонкими линиями показаны результаты описания множества значений соответствующего месяца полиномом третьей степени.

Отметим, что это оценочные результаты по всем данным, которые могут быть уточнены или выделены для каждого месяца/года, а также геомагнитных и солнечных индексов.

Из таблицы 4 видно, что коэффициент a летом-осенью изменяется незначительно, а в месяцы ЗАП увеличивается относительно осене-летнего значения на порядок величины. Это означает, что фиксированном угле возвышения Солнца, величина поглощения в период ЗА в среднем будет в 10 раз больше.

Таблица 4. Параметры полинома третьей степени, описывающего распределение величин ионосферного поглощения радиоволн в характерные месяцы.

Месяц	июнь	сентябрь	декабрь
a (дБ/град) $\cdot 10^{-5}$ в скобках даны границные значения для интервалов 95% вероятности	7.397 (7.29 , 7.504)	10.79 (10.62, 10.96)	93.75 (75.8 , 111.7)
b (град)	-10	-10	-4.858 (-5.913, -3.804)
сумма квадратов ошибок	$6.1930 \cdot 10^4$	$4.9078 \cdot 10^4$	$1.1141 \cdot 10^4$
критерий R-квадрат, квадрат смешанной корреляции	0.6228	0.6142	0.4806
Среднеквадратичная ошибка	4.5157	4.0200	1.9156
Количество точек	3036	3036	3020

5.9 Проверка через решение прямой задачи для простого случая: сезонный ход поглощения по Nh профилям IRI

В качестве еще одной проверки алгоритма был выбран наиболее прямой путь сравнения с модельными данными. В качестве такой модели была выбрана международная климатическая модель ионосферы, - IRI 2012 [56], с включенным блоком нижней ионосферы [62]. С помощью веб - интерфейса модели [84] были рассчитаны модельные профили электронной концентрации над московской ионосферной станции, начиная от высоты условного начала ионизации 60 км, до высоты, заведомо больше максимума слоя E (130 км) с шагом в 1 км, при фиксированном значении локального времени (полдень), за период с 1.06.2011 по 30.09.2016. Был произведен расчет поглощения радиоволн упрощенного выражения, аналогично показанному в п. 4.4. В приближении геометрической оптики, рассчитывался коэффициент поглощения:

$$\rho = \exp \left\{ -2 \frac{\omega}{c} \int_{h_0}^{h_{\varepsilon=0}} \chi \partial h \right\}$$

Согласно элементарной магнитоионной теории в отсутствии магнитного поля:

$$\chi = \frac{1}{2m_e \omega} \frac{4\pi e^2 N \nu}{\mu(\omega^2 + \nu^2)}$$

Выражение для действующей высоты:

$$h' = \int_{h_0}^{h_{\varepsilon=0}} \mu' \partial h,$$

выражение для комплексного показателя преломления:

$$\mu' = \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{f_{\text{раб}}^2}{f_{\text{плазм}}^2}}}$$

вертикальный профиль эффективной частоты соударений согласно газокинетическому выражению :

$$\nu(h) = e^{12.8076 - 0.158h} + e^{-6.175 - 0.0042h},$$

и решалась прямая задача численного интегрирования методом Симпсона.

Профиль электронной концентрации аппроксимировался полиномом второй степени до следующего, после рабочей частоты зондирования метода постоянной аппаратуры, значения плазменной частоты, соответствующей целому числу км. В результате моделирования был получен график на рисунке 37. Заметно качественное совпадение сезонных вариаций, а также количественное совпадение результатов исключая 2015 год. Одним из возможных объяснений этого несовпадения является возможное изменение параметров АФК в ИЗМИРАНе.

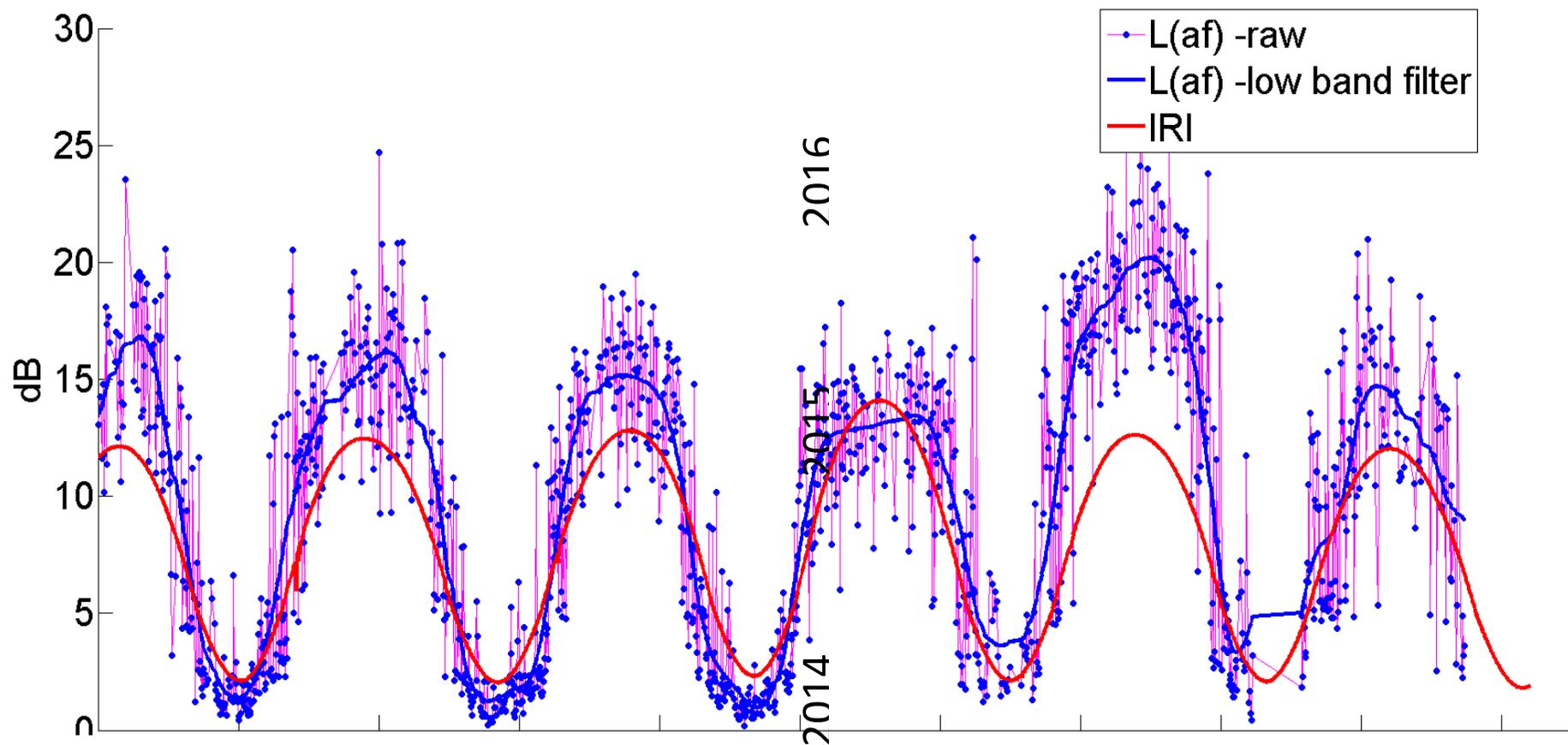


Рис.36 Сравнение модельного (IRI 2012) красная линия, и эмпирического поглощения радиоволн, рассчитанного методом амплитудного фактора (синие точки). Сплошная линия показывает эмпирические данные, усредненные низкочастотным фильтром.

5.10 Разработка статистической модели поглощения

В работах [25, 45] приводятся различные эмпирико-аналитические зависимости ионосферного поглощения, определенного методом A1, от различных геофизических факторов. Аналогичные некоторым из них, как было показано выше, наблюдаются в вариациях поглощения радиоволн определенных разработанным методом амплитудного фактора. Исходя из полученных в ходе работы данных, попробуем сформировать зависимость поглощения на фиксированной частоте 2.5 МГц от параметра F10.7 и угла возвышения Солнца. Для этого произведем очистку массива от величин поглощения, определенных в периоды солнечных вспышек, начиная от внезапного начала вспышки, и заканчивая через 15 минут после возвращения к фоновым значениям потока. Для вспышек выше M-класса, удалялся весь световой день наблюдений. Используем только геомагнитно-спокойные дни, определяемые $K_p < 3$ [83].

Использовались данные в положительном диапазоне углов возвышения Солнца над горизонтом ($\gamma = 0^\circ \dots 55^\circ$). После этого производилось усреднение величин поглощения в ячейках с шагом 2 по F10.7 и 2 град соответственно; рассчитывалось среднеквадратичное отклонение SD поглощения в каждой ячейке. Оставшиеся значения относились к диапазону F10.7 от 128 до 144 ед.. Результаты представлены на рисунках 38 и 39.

Для получения аналитического выражения зависимости $L(F10.7, \chi)$, средствами пакета программ Statistika 10 были рассчитаны полиномы второй степени, описывающие результаты эмпирических зависимостей поглощения и СКО поглощения - SD от F10.7 и угла возвышения. Результаты представлены на рисунках 40 и 41.

В целом из рисунка 40 можно подтвердить заключение о существенной зависимости величины поглощения от величины зенитного угла Солнца. Из рисунка 41 видно, что величина поглощения при увеличении угла возвышения Солнца над горизонтом и величины потока F10,7 показывает большую вариативность.

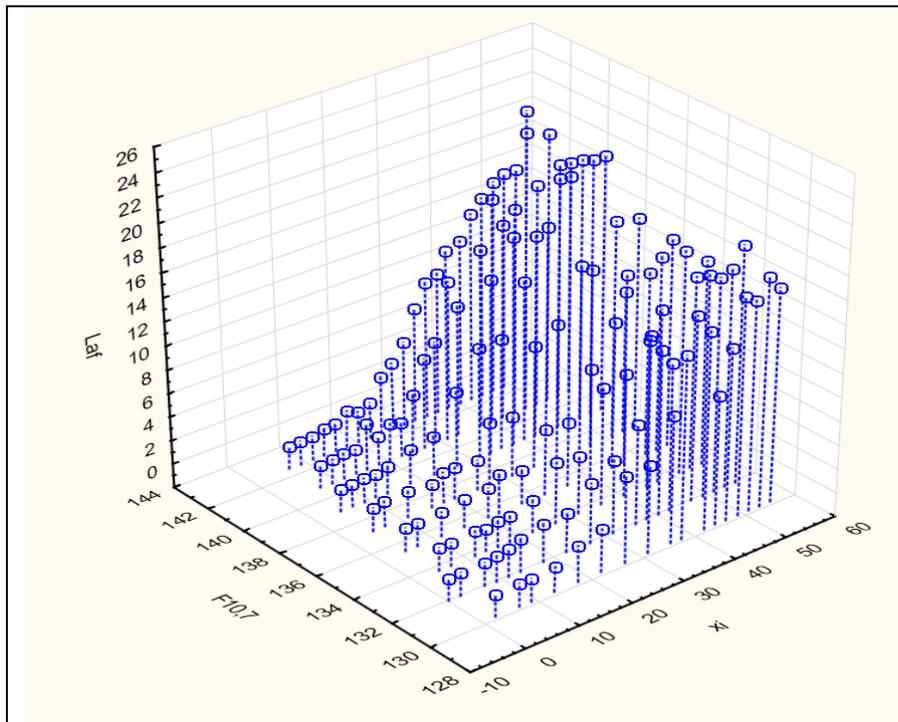


Рис. 37 Данные поглощения L в зависимости от $F_{10.7}$ и χ .

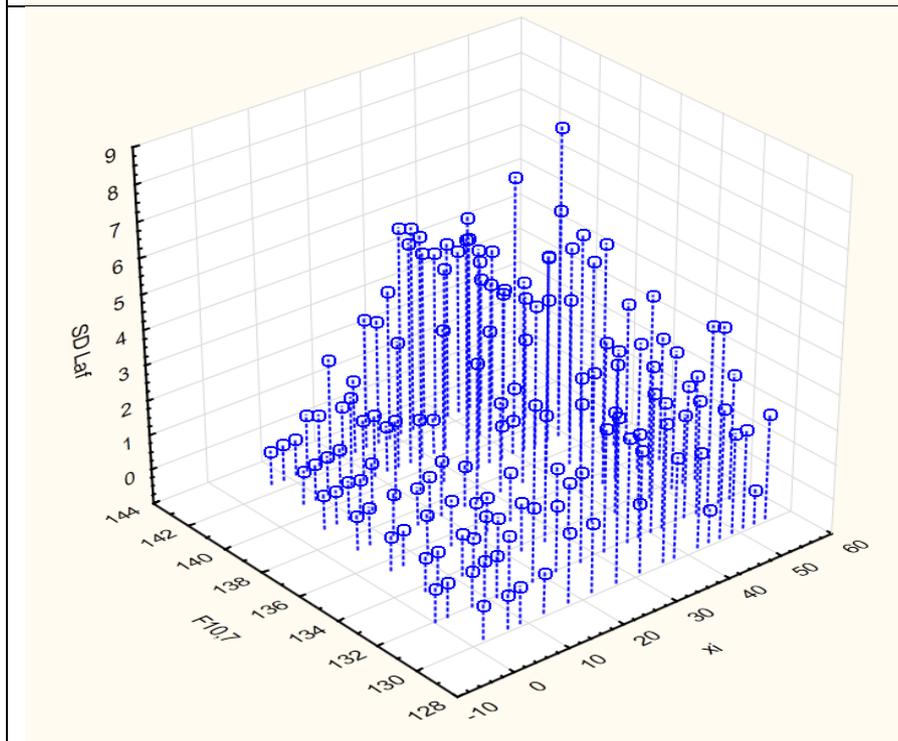


Рис. 38 Зависимость СКО (SD) в каждой ячейке от $F_{10.7}$ и χ .

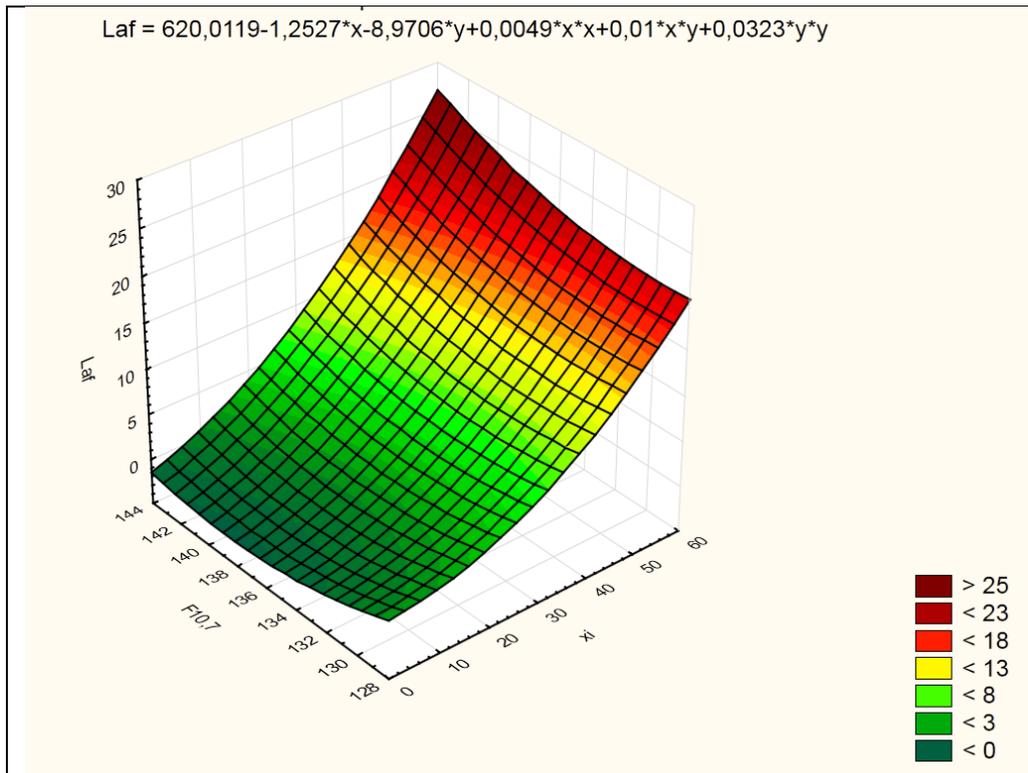


Рис. 39
Аналитическое
выражение
зависимости
поглощения L
от F10.7 и а.

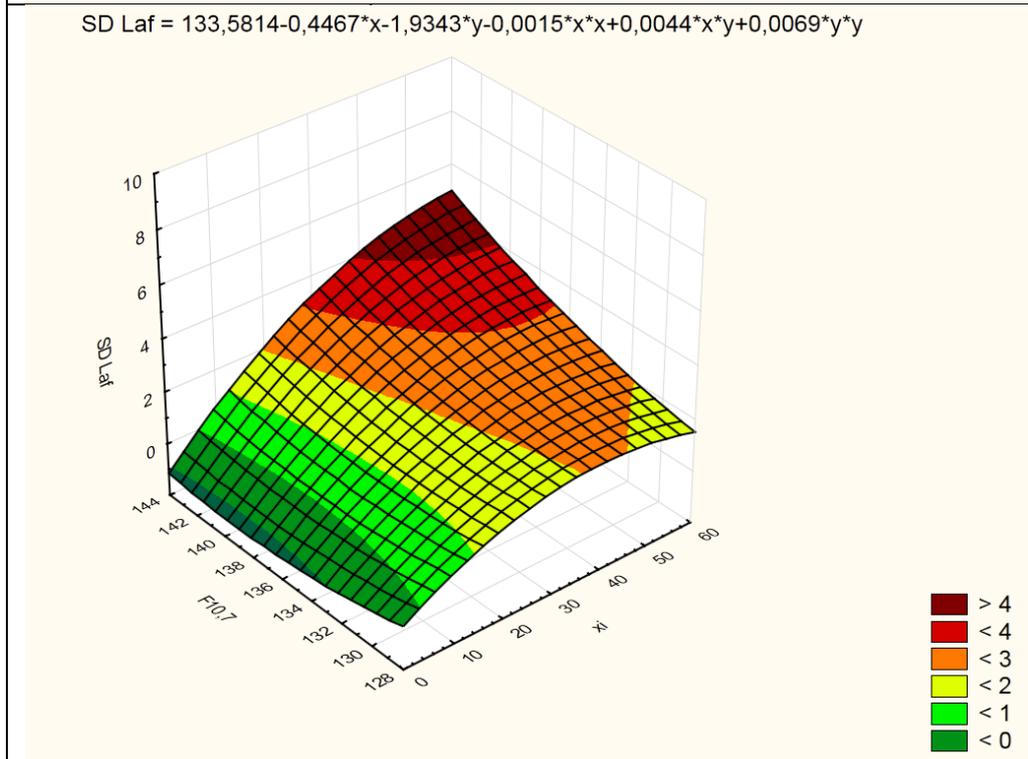


Рис 40
аналитическое
выражение
зависимости
СКО (SD) в
каждой ячейке
от F10.7 и а.

5.11 Применение метода АФ к отражениям различных ионосферных слоёв.

Так как максимум функции неотклоняющего поглощения КВ радиоволн от высоты расположен в нижней ионосфере, для получения информации о D области, логично использовать отражение от нижних слоёв, чтобы иметь данные, которые испытывают малозначительное отклоняющее поглощение в области отражения, и удобны для восстановления монотонного профиля электронной, в том числе без неопределенности в так называемой «долине» ненаблюдаемой межслоевой ионизации. На высотах > 120 км, если бы удалось производить зондирование ионосферы с этих высот, основной вклад в ослабление КВ отраженных слоев F, вносило бы «отклоняющее» поглощение в области, существенной для формирования отраженного сигнала. Это связано с уменьшением эффективной частоты соударений на этих высотах, и с увеличением в области близкой точки отражения длин лучевых траекторий. Тем не менее, величины поглощения по отражениям F слоя использовались в классическом A1 и могут быть использованы в методе АФ. Больше чем в половине случаев, геофизическая обстановка складывается таким образом, что невозможно получить отражения от регулярного слоя E, или же этих отражений недостаточно для получения АФ. В таких случаях единственной возможностью является использование отражений от регулярного слоя F, для которых критерии существования АФ выполняются почти всегда, и возможно рассчитать методом амплитудного фактора несколько величин поглощений для различных диапазонов измерений в диапазоне слоя F. Эти данные могут быть использованы для расчета эффективной частоты соударений в области F [20]. Поглощение радиоволн в ночные часы, когда слой E отсутствует, возможно определить опираясь только лишь на отражения слоя F, и ограничения по восстановлению монотонного N_h профиля, связанные с возможной «долиной» отсутствуют.

Отметим также возможность определения поглощения радиоволн по данным отражений слоя E_s спорадического, при выполнении нормального закона распределения величин поглощения в соответствующей выборке.

5.12 Верификация разработанного метода расчета амплитудного фактора по результатам анализа вариаций поглощения

1. Воспроизведение всех известных закономерностей в вариациях сезонного, суточного хода поглощения радиоволн, в т.ч. повторяющиеся аномалии сезонного хода.

В данных поглощения наблюдаются указанные вариации, а именно: сезонный ход с ярко выраженной зимней аномалией, суточные вариации, аномалия суточного хода, зависимость поглощения АФ от угла возвышения Солнца над горизонтом.

2. Регистрация воздействия вспышечных явлений (m-, c-, b- вспышки рентгена)

Указанные непериодические вариации регистрируются.

3. Легитимность математического аппарата, отсутствие нелинейных преобразований амплитуды в приемной аппаратуре.

Выполнение пункта прослеживается по материалам главы 4, по этапам подготовки данных ВЗ и формулам расчета АФ.

4. Требование равенства средних значений по частоте средним по времени (эргодичность процесса).

Выполняется при допущениях, описанных в п. 4.4.

5. Предусмотреть механизм увеличения точности, в случае успешной апробации метода.

Возможно увеличение точности путем уменьшения шага df частоты, изменения частотной сетки зондирования, количества повторений импульсов на каждой частоте.

6. Возможность преобразования в классические величины поглощения радиоволн для использования в алгоритмах прогноза распространения КВ

Механизм перехода к одной частоте описан в п. 4.3. Использование результатов АФ взамен А1 возможно, при условии учета специфики расчета АФ (усреднением по частоте) и допущений метода АФ. Потенциально могут быть неверными данные АФ поглощения при наличии локально-частотных аномалий вблизи несущей частоты.

5.13 Использование ионограмм других ионозондов

В настоящей работе разработан новый метод расчета поглощения радиоволн по данным одной ионограммы ВЗ цифрового ионозонда «Парус-А». До сих пор эти данные не исследовались и не были востребованы в качестве источников информации об ионосфере. Метод расчета поглощения, представленный в работе, потенциально может быть применен к данным других ионозондов [48, 57, 81], при условии выполнения требований к аппаратуре, описанных в главе 3.

Можно выделить ионозонд DPS-4 (США, группа Б. Рейниша) и ионозонд «Томион» (РФ, группа С.А. Колесника)[48]. Первый интересен по причине его распространенности – сама крупная международная сеть GIRO (Global Ionospheric Radio Observatory) [57, 61] – состоит в основном, из ионозондов DPS, и по причине производимой ионозондом записи амплитудной информации ионограмм. «Томион» является перспективным отечественным ионозондом, одно из таких устройств установлено на государственной наблюдательной сети. Как и ионозонд нового класса – «Dynasonde-21» [81], «Томион» представляет более

широкие возможности для изучения ионосферы. В настоящий момент данные ионозонда «Томион» не могут быть использованы для расчета АФ, т.к. в исследовательских целях включена автоматическая регулировка усиления (АРУ).

Ионозонды «Парус-А» установленные на государственной наблюдательной сети Росгидромета, могут быть использованы для расчета величин поглощения радиоволн методом амплитудного фактора, при условии реализации разделения магнитоионных компонент по признаку поляризации, доступной в базовом исполнении всех станций, однако не все станции оборудованы соответствующими антеннами.

Перспективной задачей использования амплитудной информации ионограмм ионозонда «Парус-А» может стать расчет поглощения методом амплитудного фактора на основе регистрации дополнительного наклонного сигнала синхронизированного ионозонда «Парус-А» расположенного на расстоянии наклонного односкачкового распространения КВ. Подобные ионограммы были неоднократно получены на трассе Ростов-на-Дону – Москва(ИЗМИРАН) [14]. Отметим, что на текущий момент времени старта сеансов ВЗ специально разнесены для устранения артефактов наклонного зондирования.

Выводы по главе 5

Все доступные ионограммы вертикального зондирования ионозонда «Парус-А», зарегистрированные с разделением магнитоионных компонент, с интервалом между соседними не больше 15 минут, в период с 1.6.2011 по 1.10.2016 по станциям ИЗМИРАН и Ростов-на-Дону были использованы в исследовании.

На основе этих данных получены качественно схожие с наблюдавшимися в предыдущие периоды вариации ионосферного поглощения радиоволн. Получены количественные оценки эффекта Зимней аномалии, зарегистрированы

непериодические вариации, однозначно определенные как возмущения, вызванные вспышечными явлениями. Сезонные вариации поглощения, рассчитанные из данных модели IRI -2012 и полученные методом АФ, качественно и количественно совпадают, за исключением данных 2015 года, когда можно говорить только о качественном совпадении.

Метод расчета ионосферного поглощения радиоволн по данным одной ионограммы ВЗ ионозонда «Парус-А» отвечает требованиям, описанным в выводах глав 2,3.

Заключение

Как было отмечено во введении, поглощение радиоволн может быть измерено различными методами, и в полученные различными методами величины поглощения будут значительно отличаться друг от друга. Это происходит вследствие различных причин, среди которых главные это разные высотные области, различные частоты измерений и т.п. отличия. Общим же для всех этих измерений является связь с геофизическими явлениями, которые и вызывают это геофизическое и, одновременно, радиофизическое явление – поглощение радиоволн в ионосфере.

Аналогичным отличием характеризуется и введенный в диссертации параметр амплитудный фактор поглощения радиоволн в Д-области ионосферы. В работе было показано, что он имеет одинаковые с методом измерения поглощения A1 тенденции при изменений тех параметров, которые определяют его существование: суточные и сезонные, включая среднеширотную зимнюю аномалию поглощения, зависимости от различных геофизических факторов – угла возвышения Солнца над горизонтом, параметра F10,7 и реакции на солнечные вспышки.

Отличие от результатов метода A1 не мешает использовать амплитудный фактор в тех расчетах распространения ионосферных радиоволн, в которых необходим учет поглощения и полученные результаты, как было показано, не уступают по точности ранее использованным методам.

Диссертация содержит результаты исследования разномасштабных вариаций поглощения радиоволн, рассчитанных разработанным в ходе диссертационного исследования методом амплитудного фактора, который впервые позволил определить величину поглощения радиоволн на основе данных цифровых ионограмм вертикального зондирования ионозонда «Парус-А». Получены данные поглощения радиоволн по ионограммам московской

ионосферной станции с 1.06.2011 по 1.10.2016 и станции в г. Ростов-на-Дону с 1.1.2014 по 1.10.2016.

Разработан метод оценки ионосферного поглощения радиоволн, названный методом амплитудного фактора.

Разработанный метод амплитудного фактора оценки ионосферного поглощения относится к оперативным методам дистанционной диагностики ионосферной плазмы и это создает определенные преимущества перед использованием метода временных (достаточно длительных) усреднений. Проведенные и продемонстрированные в диссертации проверки показали, что он может быть использован в целях увеличения информативности ВЗ. Внедрение АФ не затрагивает аппаратную часть ионозонда, и может быть выполнено без изменения режима работы ионозонда.

По итогам проведенных исследований получены следующие основные конкретные результаты:

1. Разработан и реализован в программном коде метод расчета ионосферного поглощения КВ по данным одной ионограммы ВЗ ионозонда «Парус-А».
2. Получены данные поглощения радиоволн по ионограммам московской ионосферной станции с 1.06.2011 по 1.10.2016 и станции в г. Ростов-на-Дону с 1.1.2014 по 1.10.2016.
3. На основе этих данных получены качественно схожие с наблюдавшимся в предыдущие периоды вариации (сезонные, суточные) ионосферного поглощения радиоволн. Зарегистрированы непериодические вариации, однозначно определенные как возмущения, вызванные вспышечными явлениями. Показано хорошее совпадение данных метода АФ с расчетами поглощения по профилям N_h модели IRI-2012.
4. Получены количественные оценки эффекта Зимней аномалии. При фиксированном зенитном угле Солнца, величины поглощения в месяцы 3А на порядок превышают величины поглощения в другие месяцы.

5. Разработан метод расчета профиля электронной концентрации в D-области по АВЧХ одной ионограммы ВЗ.

В заключение считаю своим приятным долгом выразить глубокую благодарность моему научному руководителю профессору Н.П. Данилкину за постановку и постоянное внимание к работе; Н.Г Котонаевой за полезные советы и замечания; Г.В. Гивишвили, И.В. Крашенинникову, А.Д. Данилову, Ю. К. Калинину за ценные замечания и дискуссии по анализу экспериментальных материалов; коллективу ИПГ за многолетнее плодотворное сотрудничество; любимой супруге А.Н. Филипповой за поддержку.

Список используемой литературы

1. Алимов В.А. О частотной корреляции флуктуаций радиоволн, отраженных от ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1972. Т. 12, № 3. С. 548-551
2. Новый инструмент мониторинга ионосферы - сеть радиотомографии. /Алпатов В.В., Васильев А.Е., Молодцов Д.А., Репин А.Ю., Будников П.А.// Практические аспекты гелиогеофизики - Под ред. А.А. Петруковича, А.М. Мёрзлого, С.Ю. Хабибулина. - Сер. Прикладные аспекты космической погоды. 2016. с.56-63
3. Альперт Я.Л. Распространение радиоволн и ионосфера. М., Изд-во АН СССР, 1963. 308 с.
4. Афраймович Э.Л., Интерференционные методы радиозондирования ионосферы. М., Наука. 1982. 198 с.
5. Бенедиктов, Е.А., и А.В. Толмачева, Определение электронной температуры вблизи максимума F-слоя ионосферы по измерениям поглощения радиоволн методом A2 // Изв. Вузов. Радиофизика, 1975. Т. 18 №2. С 200- .
6. Березин, Ю.В. и Гусев, В.Д., Измерения поглощения радиоволн при наличии больших неоднородностей в ионосфере // Вестник МГУ, серия III, физика, астрономия, 1961. №5, С. 39
7. Березин Ю.В., Закон распределения кажущегося коэффициента отражения радиоволн от ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия, 1964. Т. 4 №1. С. 5
8. Бичуч Е.И., Кольцов В.В. Определение частоты столкновений по амплитудно-частотным характеристикам вертикального зондирования // Геомагнетизм и аэрономия, 1985. Т. 25. № 2. С. 315–316.
9. Бичуч Е., Диагностика области E ионосферы по амплитудно-частотным характеристикам отраженных радиосигналов.: Диссертация на соискание степени кандидата наук, М., ИЗМИРАН, 1987, 129 с.
10. Оценки эффективной частоты соударений электронов в области F по измерениям поглощения радиоволн методом A1. /Водолазкин В.И.,

- Данилкин Н.П., Денисенко П.Ф. Фаер Ю.Н. // Геомагнетизм и аэрономия, 1979. Т. 19 №1. С 159-165.
11. Гивишвили Г.В. Пространственно-временные вариации поглощения в электронной концентрации в нижней ионосфере. : Диссертация на соискание степени кандидата физ.- мат. наук. М., ИЗМИРАН, 1975. 124 с.
 12. Гивишвили Г.В., Данилкин Н.П. , **Филиппов М.Ю.** Оценка ионосферного поглощения радиоволн по одной ионограмме вертикального зондирования // Геомагнетизм и Аэрономия, 2016 Т. 56 №1. С.86-92. Doi:10.7868/S0016794016010065
 13. 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. 2013. С.579 -582.
 14. Ионозонд «Парус-А»: функциональные возможности и перспективы развития. / Гивишвили Г.В., Крашенинников И.В., Лещенко Л.Н., Власов Ю.М., Кузьмин А.В. // Гелиогеофизические исследования. 2013. Т. 4, с. 68–74.
 15. Гивишвили, Г.В., Шаулин Ю.Н. К методу измерения поглощения радиоволн в ионосфере, Геомагнетизм и аэрономия. 1975. Т. 15 №3, с. 556 - 559.
 16. Гинзбург Э.И., Нестерова И.И. Эффект Зимней аномалии поглощения радиоволн. Ст. в сб. «Вопросы исследования нижней ионосферы и геомагнетизма», Новосибирск. 1973. 168с.
 17. Данилкин Н.П. Радиозондирование ионосферы спутниковыми и наземными ионозондами. Тр. ИПГ В. 91 под ред. Лапшина В.Б., М., 2014. 308 с.

18. Данилкин Н.П., Мальцева О.А. Ионосферные радиоволны (теория, алгоритмы, программы).// Издательство Ростовского университета. Ростов-на-Дону. 1977. 176 с.
19. Данилкин Н.П., Денисенко П.Ф. Номограммы для расчета модельного $n(h)$ -профиля в d-области ионосферы. Геомагнетизм и аэрономия. 1973. т. 13 №5. с. 927-929.
20. Результаты совместных измерений концентрации и эффективной частоты соударений электронов в ионосфере ракетными и наземными радиометодами во время запусков геофизических ракет «Вертикаль» /Данилкин Н.П., Денисенко П.Ф., Рудаков В.А и др., // Вертикальное зондирование верхней атмосферы и ионосферы. Изд -во РГУ, 1989. С. 42.
21. Экспериментальное исследование параметров частотного метода усреднения сигнала в ионосфере / Данилкин Н.П., Суций С.М., Соколовский В.И., Фаер Ю.Н., Черкашин Ю.Н. // Геомагнетизм и аэрономия. 1976. Т.16. С.803.
22. 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, - В. 91, с. 89-92.
23. Данилкин Н.П., **Филиппов М.Ю.** Методы извлечения дополнительной информации из ионограмм вертикального зондирования. // Сб. тр. XIII конференции молодых ученых "Взаимодействие полей и излучения с веществом" БШФФ-2013. Иркутск, 2013. С. 209–210.
24. Метеорологические эффекты в ионосфере. /Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикян Г.Я. // Гидрометеиздат, 1981. 269с.
25. Данилов А.Д. Физика области D и прогноз распространения радиоволн (обзор). Изв. ВУЗов. // Издание Горьковского университета и НИРФИ, Радиофизика. 1981. Т.16 с. 1171-1198.

26. Денисенко П.Ф. Энергетические потери декаметровых радиоволн в среднеширотной ионосфере : Диссертация на соискание степени доктора физико-математических наук / ИЗМИРАН, Ростов-на-Дону, 1989. - 276 с.
27. Жулина Е.М. О надежности моделей плотности и частоты соударений электронов // Ионосферное прогнозирование. М., Наука. 1982. С. 172 - 177.
28. Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Уравнение дистанционного радиозондирования в методе частичных отражений. Радиофизика и радиоастрономия. 2007. Т. 12, №4, с. 385-398.
29. Полякова А. С., Черниговская М. А., Перевалова Н. П. Ионосферные эффекты внезапных стратосферных потеплений в Восточносибирском регионе России. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 85-96.
30. Ратклифф Дж. А. Магнито-ионная теория и её приложения к ионосфере. М.: Издательство иностранной литературы. 1962. 248 с.
31. Ришбет Г., Гарриот О. Введение в физику ионосферы. Л., ГМИЗ, 1975. 304 с.
32. Решения конференции РРВ, Томск, 2016, электронный документ http://symp.iao.ru/files/symp/docs/doc-00259_ru.pdf
(ссылка доступна на 17.02.2017)
33. РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.1057-2 Распределения вероятностей, касающихся моделирования распространения радиоволн. (1994-2001-2007)
34. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Часть I. Случайные процессы. М.: Наука, 1976, 494 с.
35. Соцкий В.В. Определение высотных распределений электронной концентрации по ионограммам ионозонда "Парус"// Гелиогеофизические исследования. В. 4, с. 47–57.
36. Чавдаров С.С. Относительный коэффициент отражения радиоволн по наблюдениям в г. Ростове на Дону. // Ученые записки Ростовского государственного университета, 1947. Т.9, № 5.

37. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. -М.:Сов. радио,1972. 464 с.
38. Черкашин Ю. Н., Чернова В. А.. К применению метода параболического уравнения для расчета волновых полей в неоднородной ионосфере// В сб. "Дифракционные эффекты декаметровых радиоволн в ионосфере", М., "Наука", 1977.
39. Черниговская М.А., Сутырина Е.Н., Ратовский К.Г. Метеорологические эффекты ионосферной возмущенности над Иркутском по данным вертикального радиозондирования. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2014, Т. 11, № 2 с.264-274
40. Кававадзе. Д.К. и др., Частотная зависимость поглощения радиоволн в ионосфере// Труды Тбилисского Госуниверситета. 1977. Т. 188, с. 33 - 41.
41. Казанцев А.Н. Развитие метода расчета напряженности электрического поля коротких волн. // Труды ИРЭ, 1956, №2 с.134-159.
42. Казимировский Э. С., Кокоуров В. Д. Движения в ионосфере. Новосибирск: Наука, 1979. 344 с.
43. Козлов А. Н., Гарбацевич В. А. Ромбические антенны ионозонда – результаты компьютерного моделирования. // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов, 2008, №10 с. 243-249.
44. Миркотан, С.Ф. Косовцов Ю.Н., Журавлев С.В. Статистическая модель многократно отраженного ионосферного сигнала и его соотношение сигнал/шум // Иссл. по геомаг., аэрон. и физ. Солнца. 1982, В. 59, с 81-87.
45. Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли, М., Мир. 1977. 370 с.
46. Погрешности прогнозирования ионосферного прохождения радиоволн на основе глобальной ионосферной модели. /Крашенинников, И.В. , Егоров И.Б., Коломийцев О.П., Черкашин Ю.Н. // Геомагнетизм и аэрономия, 2004, Т. 44, № 3, С. 221–226.

47. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. : пер. с англ. М., Наука.,1977. 342 с.
48. Сетевой ионозонд для определения пространственно-временного распределения параметров ионосферы Земли / Колесник С.А., Колмаков А.А., Сарычев В.Т., Хайтов Р.К. // Гелиогеофизические исследования, 2013, №4, <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=177> (ссылка доступна 3.3.2017)
49. Шейдаков Н.Е. Диагностика неоднородной структуры ионосферы наземными и ракетными радиометодами.: Диссертация на соискание степени кандидата наук. М.: РГУ, Ростов-на-Дону, 1998, 150 с.
50. Филиппов М.Ю. Апробация алгоритма оценки ионосферного поглощения радиоволн по ионограммам вертикального зондирования ионозонда «Парус-А»// Сб. тр. «ИРЭМВ.-2015» Таганрог-Дивноморское, 2015. С.579 -582.
51. Филиппов М.Ю. Данилкин Н.П. Амплитудный фактор ионограммы вертикального зондирования как интегральная характеристика ионосферного слоя // Известия Вузов. Физика. 2016. Т.59 №12-2, С. 97-99.
52. Флигель М.Д. Географическое распределение поглощения радиоволн в ионосфере // Диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н. М., 1963. 177с.
53. Гарбацевич В. А. Исследование излучателей и сигналов ионозонда и георадара для диагностики геофизических сред. Диссертация на соискание степени к. физ.- мат. наук. Троицк, ИЗМИРАН, 2008. 135 с.
54. Хандовлетов И. Исследование поглощения и полризации радиоовлн отраженных от ионосферы при вертикальном зондировании в средних широтах. : Диссертация на соискание степени к.ф.-м.н Ашхабад, 1981. 172 с.
55. Power variation analysis of echo signals from ionospheric reflectors. / Bianchi C., Baskaradas J.A., Pietrella M., Sciacca U., Zuccheretti E. // Advances in Space

Research V. 51, Issue 5, 1 March 2013, P. 722–729
DOI: 10.1016/j.asr.2012.09.045

56. Bilitza, D. The International Reference Ionosphere 2012 – a model of international collaboration / D. Bilitza, D. Altadill, Y. Zhang, Ch. Mertens, V. Truhlik, Ph. Richards, L-A. McKinnell, B. Reinisch // *Journal of Space Weather and Space Climate*. 2014. V. 4. A07. P. 1-12. DOI: 10.1051/SWSC/2014004.
57. Bodo W. Reinisch and Ivan A. Galkin. Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO) *Earth Planets Space*. 2011. V. 63, p. 377–381
58. Beynon, W.J.G., and S. Rangaswamy, Electron collision frequency in the F-region of the ionosphere // *Nature*. 1968. V. 218, p. 1237.
59. Modeling of HF propagation at high latitudes on the basis of IRI / Blagoveshchensky D.V., Maltseva O.A., Anishin M.M., Rogov D.D., Sergeeva M.A. // *Advances in Space Research*. 2016. V.57 p. 821–834.
60. Budden, K.G., Effect of electron collisions on the formulas of magneto-ionic theory, *Radio Sci*. 1965. V. 69 D(2), p. 191.
61. Assimilation of GIRO data into a real-time IRI / I.A. Galkin, B.W. Reinisch, X.Huang, D.Bilitza // *Radio Science*. 2012. V. 47. RS0L07. doi:10.1029/2011RS004952.
62. Gulyaeva T. L., Progress in ionospheric informatics based on electron-density profile analysis of ionograms, *Adv. Space. Res.*, 1987. v. 7, №6. p. 107-110. DOI:10.1016/0273-1177(87)90269-9.
63. Gnanalingam S. Equatorial ionospheric absorption during half a solar cycle (1964–1970) // *J. Atm. Terr. Phys*. 1974, V.36, p. 1335- 1354.
64. Gnanalingam S., Kane J.A. Shortcomings in our understanding of the lower ionosphere as revealed by an analysis of radiowave absorption measurements- *J. Atm. Terr. Phys*. 1978, V. 40, p. 629 - 642.
65. Harrich, M. Friedrich M., Marple S.R., and Torkar K.M. The background absorption at high latitudes// *Advances in Radio Science*. 2003. V.1 p. 325–327

66. Herbert Th. Tables of virtual heights for models of monotonic and nonmonotonic ionospheric layers // Radio Sci.-1967.-V.2. № 10.-7. P.1269-1277
67. HF propagation prediction method ITU-R P.533-5 (Question ITU-R 223/3)
68. Laštovichka J. Diurnal asymmetry in the lower ionosphere – seasonal variability. *Studia geoph, et geod.* 1978. V.22 p.309-313
69. Lower ionosphere at middle latitudes: its morphology and response to meteorological and solar-terrestrial activity during the DYANA campaign 1990 *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1994. V. 56, № 13114, pp. 1947-1962.
70. Mechtly E., Bilitza D., Models of D-region electron concentration, Rep. IPW-WB1, Inst. fur phys. Weltraumforsch., Freiburg, Germany, 1974.
71. Rep. UAG-57 Manual on ionospheric absorption measurements, edited by K. Rawer, WDC A, NOAA, Boulder, Colorado. 1976,
72. Newbery S. M., Dyson P. L., Singh A. An inversion procedure for obtaining collision frequency profiles from swept-frequency absorption measurements, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1989. V. 51, №.5, p. 420-432.
73. Itikawa, Yu, Effective collision frequency of electrons in atmospheric gases, *Planet. Space Sci.* .1971. v.19, P. 993,
74. Rep. UAG-93, Ionogram analysis with the generalized program POLAN. WDCA, 1985
75. E. Kudeki. Lecture Notes on Applications of Radiowave Propagation. Department of Electrical and Computer Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign. ed. 2010. P. 253.
76. Setty, C.S.G.K., Electron collision frequency in ionospheric layers, *Indian J. Radio Space Phys.*, 1972. V.1, P.38.
77. Settimi A., Pietrella M., Pezzopane M., Zolesi B., Bianchi C., Scotto C. The COMPLEIK subroutine of the IONORT-ISP system for calculating the non-deviative absorption: A comparison with the ICEPAC formula. *Advances in Space Research*. 2014. V. 53, p. 201–218,.

78. Thrane, E.V., and W.R. Piggott, The collision frequency in the D- and E-region of the ionosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.* 1966. V.28(8), p. 721
79. Thomson N. R., Rodger. C. J. Large solar flares and their ionospheric D region enhancements. *Journal Of Geophysical Research*, VOL. 110, A06306, doi:10.1029/2005JA011008, 2005
80. Yaxin Yu, Jiajun Niu, Jamesina J. Simpson A 3-D Global Earth-Ionosphere FDTD Model Including an Anisotropic Magnetized Plasma Ionosphere // *IEEE Transactions on antennas and propagation* 2012, V. 60, № 7, J. 2012
81. Zabotin N.A., J.W. Wright, and G.A. Zhabankov (2006), NeXtYZ: Three-dimensional electron density inversion for dynasonde ionograms, *Radio Sci.*, V. 41, RS6S32, doi:10.1029/2005RS003352
82. Zuev V. V. , Nagorski P. M.. Estimation Method of the Ionospheric D region Using Space Based Radio Facilities // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2012, V. 48 №9, p. 879–886. DOI: 10.1134/S0001433812090186
83. База данных NOAA индекса F10.7, индекса Ap
ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/old_indices/
(ссылка доступна 03.03.2017)
84. Web - интерфейс модели IRI - 2012
http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html
(ссылка доступна 03.03.2017)
85. Данные потока солнечного рентгена спутника GOES
<http://darts.isas.jaxa.jp/pub/solar/mirror/sswdb/goes/xray/>
(ссылка доступна 03.03.2017)
86. РД 52.26.817-2015 Руководство по ионосферным, магнитным и гелиогеофизическим наблюдениям. Часть I. Ионосферные наблюдения. М., 2015. 270 с.

Приложения

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016610413 «Параметризованный Nh-профиль D-области ионосферы» от 12 января 2016.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016610413

Параметризованный Nh-профиль D-области ионосферы

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное учреждение "Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова" (RU)*

Автор: *Филиппов Михаил Юрьевич (RU)*

Заявка № **2015661080**

Дата поступления **17 ноября 2015 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **12 января 2016 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

