

Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Кафедра «Телекоммуникационные системы»

Специальность: 6М071900 «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

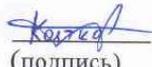
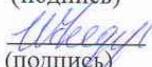
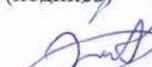
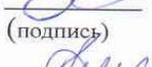
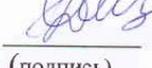
Зав. кафедрой
к.т.н., профессор Байкенов А.С.
(ученая степень, звание, ФИО)

(подпись)

« ____ » _____ 2016 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
пояснительная записка

на тему: «Исследование воздействия возмущенной корпускулярной радиации на характеристики радиоволн коротковолнового диапазона»

Магистрант: <u>Колтков Д.М.</u> (Ф.И.О.)	<u></u> (подпись)	<u>группа МТСп 14-1</u>
Руководитель: <u>к.ф.-м.н., доцент</u> (ученая степень, звание)	<u></u> (подпись)	<u>Федулина И. Н.</u> (Ф.И.О.)
Рецензент: <u>к.т.н., зав. кафедрой</u> (ученая степень, звание)	<u></u> (подпись)	<u>Касимов А.О.</u> (Ф.И.О.)
Консультант по ВТ <u>ст.препод</u> (ученая степень, звание)	<u></u> (подпись)	<u>Демидова Г.Д.</u> (Ф.И.О.)
Нормоконтроль: <u>ст.препод</u> (ученая степень, звание)	<u></u> (подпись)	<u>Кондратович А.П.</u> (Ф.И.О.)

Алматы 2016

Рисунок 1.14 - Экранирование слоя E происходит при режиме 1F или частотах излучения ниже МПЧ для 2E режима. Обратите внимание, что сигнал проходит область поглощения D

Рисунок 1.15 - Затухания затрагивают только те пути, где волна проходит через область D, т.е. каналы с дневными секторами. Ночные каналы не затронуты затуханиями.

Рисунок 1.16 - Затухания затрагивают главным образом низкие частоты. Высокие частоты затухает гораздо меньше, и восстанавливаются быстрее

Рисунок 1.17 - График влияния ионосферной бури на частоты станции в Канберре, Австралия. Верхние частоты были бы вероятно неприменимы в течение этого времени

Рисунок 2.1 - Внешний вид Изделия

Рисунок 2.2 - Спектрограмма занятости эфира

Рисунок 2.3 - Детальное рассмотрение одной из выбранных рабочих частот

Рисунок 2.4 - Фрагмент данных БАРС

Рисунок 2.5 - Рабочая область программы BARS Analysis

Рисунок 2.6 - График интенсивности нейтронной компоненты галактических космических лучей с 15 по 30 июня 2015 г.

Рисунок 2.7 - Вариация КВ-радиосигнала на частоте 10 МГц

Рисунок 3.1 - Плотность электронов в ионосфере

Рисунок 3.2 - Параболическая модель слоя

Рисунок 3.3 - Образование мертвой зоны

Рекомендуемая основная литература

1. Козин И.Д., Федулина И.Н. Солнечные вспышки и распространение радиоволн // Известия НАН РК. – 2015. - Т. 4. - № 302. – С. 40-45.

2. В.Л. Гинзбург. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: «Наука», 1967, 683 с.

Г Р А Ф И К
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
1. Информационный обзор согласно теме	05.10.2014	
2. Основные направления развития и проблемы анализа влияния корпускулярной радиации на передачу радиоволн	14.01.2014	
3. Исследование устройства спектроанализатора БАРС	02.02.2015	
4. Расчет взаимодействия радиоволн с ионосферой	18.10.2015	
5. Анализ полученных экспериментальных и расчетных данных	10.12.2015	

Дата выдачи задания 20.09.14

Заведующий кафедрой _____ (подпись) (Байкенов А.С.)
(Ф.И.О.)

Руководитель диссертации Штедул (подпись) (Федулина И.Н.)
(Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению магистрант Колтков (подпись) (Колтков Д.М.)
(Ф.И.О.)

Аннотация

Данная магистерская диссертация посвящена исследованию реакции КВ-сигналов на возмущения в ионосфере Земли, рассматриваемой причиной которых послужила корпускулярная радиация. Проведен анализ и выбор рабочих частот, выбран период испытания. На основе экспериментальных данных, полученных с использованием многоканального спектрального анализатора «БАРС», исследованы изменения параметров радиоволн КВ-диапазона в зависимости от интенсивности воздействия космических частиц на ионосферу Земли.

Abstract

This master's thesis is devoted to investigation of the reaction HF signals to ionospheric disturbances of the Earth, considered the cause of which served as a corpuscular radiation. The analysis and choice of operating frequency is selected during the test. On the basis of experimental data obtained using a multi-channel spectrum analyzer "BARS" the changes in the parameters of HF radio waves depending on the intensity of the impact of cosmic rays on the Earth's ionosphere have been investigated.

Андатпа

Бұл магистрлік диссертация Жер ионосферных наразылық реакция КВ-сигналдарды тергеу арналған, ол корпускулярлық сәулелену болып қызмет атқарды, оның себебін қарастырды. Жұмыс жиілігі талдау және таңдау, сынау барысында таңдалады. Эксперименттік деректер негізінде Жердің ионосферасындағы бойынша ғарыштық сәулелері әсер қарқындылығына байланысты, көп арналы спектрі талдағышының «Барс» КВ-радиотолқындардың параметрлерін өзгерістер пайдаланып алынған.

Содержание

Введение	7
1 Общие положения	8
1.1 Ионосфера	9
1.1.1.Области Ионосферы	10
1.1.2 Возникновение и исчезновение электронов в ионосфере	10
1.1.3 Обзор ионосферы	10
1.1.4 Вариации в ионосфере	12
1.1.4.1 Вариации в зависимости от солнечного цикла	12
1.1.4.2 Сезонные вариации	13
1.1.4.3 Вариации с широтой	14
1.1.4.4 Суточные вариации	14
1.1.5 Вариации в поглощении	14
1.1.6 Слой E (спорадический слой)	15
1.1.7 Распространение F	16
1.2 Высокочастотная связь	17
1.2.1 Типы распространения ВЧ	17
1.2.2 Частотные пределы ионосферных волн	18
1.2.3 Частотный диапазон, пригодный к применению	18
1.2.4 Длина расстояния отраженного скачка	19
1.2.5 Варианты распределения радиоволн	20
1.2.6 Экранирование E слоя	21
1.3 Коротковолновые затухания	22
1.4. Космическая погода	25
2 Экспериментальная часть	28
2.1 Описание спектроанализатора БАРС	29
2.1.1 Назначение изделия	29
2.1.2 Устройство и работа	29
2.1.3 Тестирование многоканального анализатора спектра «БАРС»	32
2.2 Проведение эксперимента	33
3 Расчетная часть	34
Заключение	43
Список литературы	44
Приложение А – Окно программы MathCAD	45

Введение

Физика околоземного пространства, особенно с точки зрения космической погоды, в настоящее время является областью значительного внимания ученых-исследователей и относится к числу важных, актуальных направлений в науке.

Представления о космической погоде, то есть о динамических, сильно меняющихся условиях в околоземной среде, включают условия на Солнце, в межпланетном пространстве, в системе магнитосфера – ионосфера – атмосфера Земли. Солнечные вспышки, пятна и т.п. вызывают в околоземном пространстве резкие изменения. Неблагоприятные изменения космической погоды влияют на надежность работы – как космических аппаратов, так и различных систем типа связи, навигации, энергетических линий и пр. Важнейшей задачей сегодня ставится предсказание и смягчение неблагоприятных эффектов космической погоды.

Широко известно, что коротковолновая радиосвязь играет важную роль при передаче информации на дальние и сверхдальние расстояния ведомственными и вневедомственными службами, силовыми структурами и другими организациями.

Конкуренцию в решении подобных задач могут составлять лишь спутниковые системы связи, которые обладают большей пропускной способностью канала связи, а также большей надежностью передачи информации. Неоднократно высказывались предположения о вытеснении коротковолновой связи другими более надежными и скоростными видами связи. Однако такого не произошло в силу того, что коротковолновые системы связи обладают такими важными особенностями как высокая живучесть, сравнительная простота и малая стоимость создания и обслуживания. Эти особенности делают коротковолновые системы незаменимыми при резервировании других систем связи

Целью работы является – исследование воздействия возмущенной корпускулярной радиации на характеристики радиоволн коротковолнового диапазона.

1 Общие положения

1.1 Короткие волны

Рассматривая в целом, короткие волны — это радиоволны, длина которых составляет 10-50 м. Особенности их распространения являются главным отличием между короткими волнами и более длинных волн (длиннее 100-200 м).

Распространение коротких волн происходит, в основном, в верхних слоях атмосферы в виде пространственной волны, поскольку поверхностная волна для коротких волн достаточно быстро ослабевает за счёт сильного поглощения радиоволн Землей.

Пространственная же волна, распространяющаяся на большой высоте над поверхностью Земли, не испытывает поглощения в ней. Её возвращение на Землю происходит с помощью преломления в ионосфере. Поэтому связь возможна посредством пространственных волн между точками, разделённые выпуклостью Земли. При возвращении волна может отразиться от поверхности Земли, затем снова достичь ионосферы, вторично преломиться в ней и вернуться на Землю на расстоянии, превышающем первоначальное примерно в два раза. При распространении коротких волн на очень большие расстояния, как правило, происходит хотя бы двукратное преломление в ионосфере и отражение от поверхности.

Особенности распространения коротких волн определяют их применение для радиосвязи. Короткие волны позволяют поддерживать связь на очень большие расстояния, используя при этом малые мощности, но сама возможность и условия связи сильно зависят от времени года и суток, так как этим определяется степень ионизации и высота различных слоев ионосферы. Для того, чтобы обеспечить регулярную связь, появляется необходимость пользоваться в разное время года и суток волнами разной длины (применение "дневной" и "ночной" волны).

Короткие волны используются для профессиональной радиосвязи в местностях, где нет возможности использовать другие виды связи (радиорелейная, сотовая, телефонная (проводная)– каждый вид связи имеет свои недостатки).

Радиорелейная связь (от англ. Relay — передавать, транслировать) — один из видов радиосвязи, образованной цепочкой приёмо-передающих (ретрансляционных) радиостанций. Наземная радиорелейная связь осуществляется обычно на деци- и сантиметровых волнах (от сотен мегагерц, до десятков гигагерц). На протяжении всей линии связи требуется установка мачт ретрансляторов.

Сотовая связь - один из видов мобильной радиосвязи. Ключевая особенность заключается в том, что общая зона покрытия делится на ячейки (соты), определяющиеся зонами покрытия отдельных базовых станций (БС). Соты частично перекрываются и вместе образуют сеть. На идеальной (ровной

и без застройки) поверхности зона покрытия одной БС представляет собой круг, поэтому составленная из них сеть имеет вид шестиугольных ячеек (сот).

Сеть составляют разнесённые в пространстве приёмопередатчики, работающие в одном и том же частотном диапазоне, и коммутирующее оборудование, позволяющее определять текущее местоположение подвижных абонентов и обеспечивать непрерывность связи при перемещении абонента из зоны действия одного приёмопередатчика в зону действия другого. Вне зоны покрытия связи нет.

Телефонная (проводная) связь — позволяет организовывать (устанавливать соединение) и вести местные, внутризоновые, междугородные и международные телефонные переговоры и передавать факсы, а также устанавливать модемное соединение в режиме реального времени. При телефонном звонке, подключение между обоими собеседниками устанавливается через телефонную станцию исключительно с целью организации разговорного соединения (таким является и сигнал для факса и модемный сигнал).

Голосовые сигналы передаются по определённым телефонным линиям, через выделенное подключение. Телефонные звонки требуют разветвлённой сети связи телефонных станций, связанных закрепленными телефонными линиями, подвода волоконно-оптических кабелей и спутников связи. Высокие затраты телефонных компаний приводят к весьма высокой стоимости междугородных переговоров. Выделенное подключение телефонной станции также имеет много избыточной производительности и/или времени простоя в течение речевого сеанса.

Обзор частот, по прохождению сигнала:

- диапазон 4 МГц является ярко выраженным ночным диапазоном. В дневное время связь на нем возможна только с ближайшими корреспондентами (поверхностной волной, на несколько десятков километров). С наступлением темноты возможна связь с удаленными корреспондентами (до 1000 км). Через 1 – 1,5 часа, после восхода солнца дальняя связь прекращается;

- диапазон 6 МГц имеет свои особенности. Летом связь возможна поверхностной волной только с ближайшими корреспондентами, 50 - 70 км. В дневное время связь возможна отраженной волной до 300 – 400 км, а зимой – до 500 – 700 км. В вечерние и ночные часы связь возможна на расстояние от 1500 - 2500 км;

- диапазон 8 МГц является “дневным”. Связь происходит как поверхностной волной, так и отраженной от ионосферы. С восходом солнца связь возможна только с ближайшими корреспондентами (поверхностной волной, 50-70 км), и отраженной волной на расстояние 500 – 1000 км. К середине дня связь возможна на расстояние 1500 – 5000 км. С наступлением сумерек связь прекращается.

К числу преимуществ коротких волн необходимо отнести:

- 1) возможность передачи на большие расстояния сравнительно малыми мощностями;
- 2) невысокие мачты;
- 3) возможность направленной передачи данных и избирательного вызова корреспондента (при условии использования соответствующего оборудования);
- 4) небольшая полоса излучения радиостанций, что позволяет работать большому количеству радиостанций, на небольшом участке диапазона, и не мешать друг другу;
- 5) возможность применения быстродействующей передачи данных и передачи изображений.

К числу недостатков коротких волн относятся:

- 1) высокое требование стабилизации частоты, так как некоторое изменение частоты во время работы срывает прием;
- 2) неодинаковое прохождение волн в разное время суток и года, причем одна и та же волна, принимаемая с высокой слышимостью днем, может быть совершенно не слышна вечером, ночью и утром;
- 3) замирание — периодическое изменение слышимости во время передачи, которое иногда бывает очень частым, иногда же незаметно и которое очень часто уменьшает слышимость в некоторые моменты до нуля;
- 4) мертвые зоны — между зонами приема поверхностных и пространственных волн может наблюдаться зона молчания. Для передатчика, антенна которого имеет равномерное излучение в горизонтальной плоскости, зона молчания имеет вид кольцевой площади разделяющей зоны слышимости. Границы этого пояса определяются минимальной напряженностью поля, еще обеспечивающей прием на фоне помех. Причина существования зоны молчания достаточно проста, до этой зоны земные волны уже не доходят, поглощаясь почвой, а отраженные волны до этой зоны еще не доходят, так как отражаются только при падении под углом, и возвращаются на землю за зоной молчания.

Внутренний радиус зоны молчания зависит от мощности излучения поверхностных волн, и в редких случаях превышает сотню километров, внешний же радиус зоны молчания при работе КВ станций на дальние расстояния, т.е. под малыми углами возвышения, может превышать тысячу километров. С пунктом, находящимся в зоне молчания для данной длины волны и для данной передающей антенны, нельзя добиться связи увеличением мощности передатчика.

Недостатки коротких волн удается ослабить только при тщательном учете и анализе всех компонентов, влияющих на распространение радиоволн, прежде всего, работой различными волнами в различное время года и суток и с применением различных антенно-фидерных устройств.

1.2 Ионосфера

Ионосфера — это часть верхней атмосферы, где плотность свободных электронов достаточна, чтобы оказывать значительное влияние на распространение радиоволн.

Ионосфера расположена на высоте 80 - 100 км над Землей. Она обладает электропроводимостью (благодаря наличию ионизированных газов), имеет способность отражать радиоволны обратно на Землю, и это явление используется для радиовещания.

Ионизация – процесс, в котором посредством отрицательно заряженных электронов происходит отсоединение (или присоединение) от нейтральных атомов или молекул для образования положительно (или отрицательно заряженных) ионов и свободных электронов. Термин "ионы" и дал название ионосферы, в которой свободно движутся электроны, что очень важно, если говорить о прохождении радиоволн на высоких частотах (КВ: 3-30 МГц). Это позволяет говорить о том, что чем больше количество электронов, тем более высокие частоты появляется возможность использовать.

Ионизация зависит в первую очередь от активных явлений на Солнце. Ионосферные структуры и максимумы плотностей в ионосфере сильно зависят от времени (фазы цикла солнечной активности, времени года и времени суток), от географического положения (полярная и авроральная зоны, среднеширотные и экваториальные области) и от ионосферных возмущений, вызванных солнечной активностью. Основная часть ионизации обусловлена солнечным излучением в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах, и корпускулярным потоком Солнца. Ионизация возрастает на освещенной Солнцем стороне Земли и убывает на теневой.

Небольшой вклад в ионизацию ионосферы дают и космические лучи. Любое атмосферное возмущение влияет на распределение ионизации. Ионосфера является динамической системой, контролируемой многими параметрами, включая звуковые волны в атмосфере, электромагнитное излучение Солнца и вариации геомагнитного поля.

1.2.1 Области ионосферы

В определённой области, простирающейся в высоту примерно от 50 км до 500 км, происходит ионизация под воздействием солнечной радиации, что приводит к образованию атмосферного газа. Данная область называется ионосферой, рисунок 1.1.

В течение всего дня возможно существование 4 областей, называемых D, E, F1 и F2. Они находятся примерно на таких высотах:

- область D: 50-90 км;
- область E: 90-140 км;
- область F1: 140-210 км;
- область F2: более 210 км.

За всё время дневного периода, спорадический слой (непостоянный) можно иногда наблюдать в области E, и в определенное время солнечной

активности область F1 не разделена с областью F2, они становятся объединены в общую область F. В ночное время в областях D, E и F1 становится настолько мало свободных электронов, что связь возможна только в области F2.

Возможность преломления высокочастотных волн существует только в слоях E, F1, спорадическом слое E (если присутствует) и области F2. Область D также важна, поглощая и ослабляя их.

F2 является самой важной областью в распространении высокочастотных радиоволн, поскольку:

- она присутствует круглосуточно;
- высокое расположение обеспечивает максимальную дальность связи;
- она чаще всего отражает верхний предел частот в высокочастотном диапазоне.

Самое продолжительное по времени существование электронов возможно именно в области F2, что является одной из причин появления этой области в ночное время. Обычное время существования электронов в областях E, F1 и F2 около 20 секунд, 1 минуты и 20 минут соответственно.

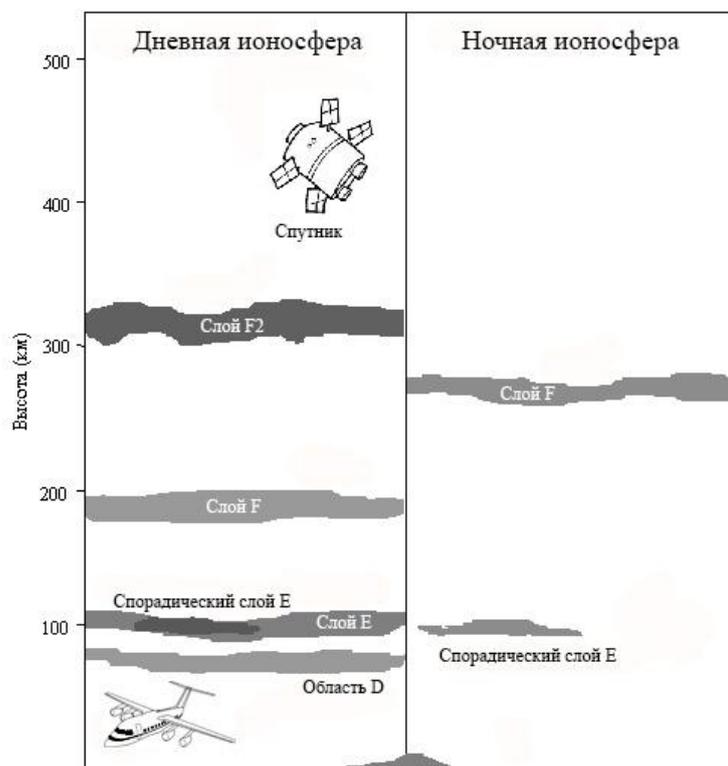


Рисунок 1.1 – Дневная и ночная структура ионосферы

1.2.2 Возникновение и исчезновение электронов в ионосфере

Солнечная радиация является причиной ионизации в ионосфере. Электроны возникают при воздействии солнечной радиации на незаряженные атомы и молекулы, рисунок 1.2. Так как этот процесс требует солнечной радиации, возникновение электронов происходит только в освещаемой части полусферы ионосферы.

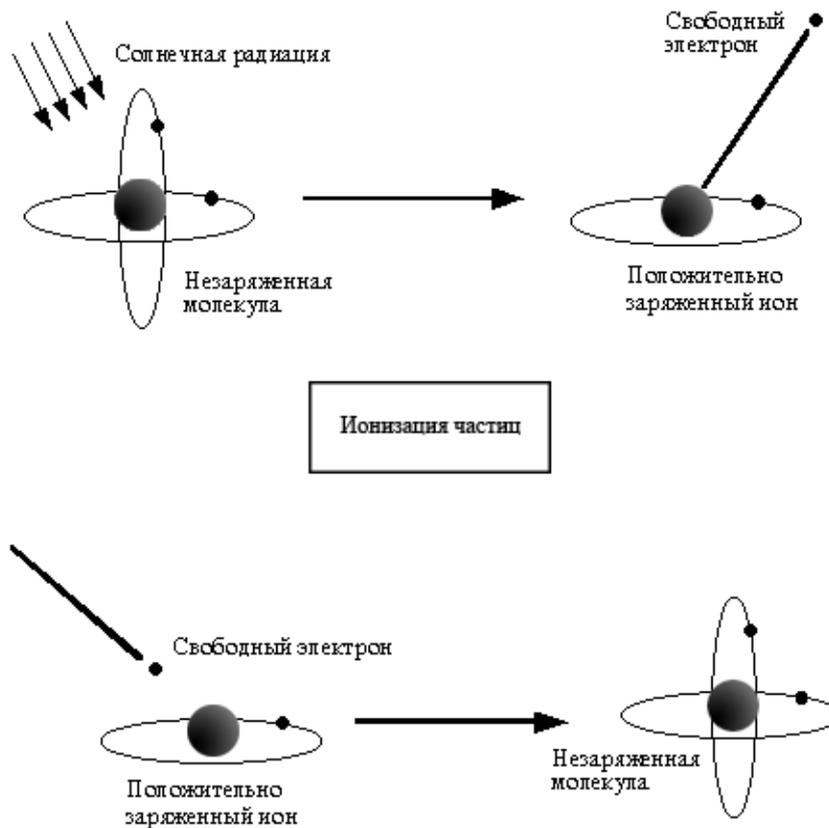


Рисунок 1.2 – Ионизация частиц

Когда свободный электрон связывается с положительно заряженным ионом, это обычно вызывает формирование нейтрально заряженной частицы. По существу, процесс исчезновения является противоположным процессу возникновения. Возникновение и исчезновение - это постоянные процессы, которые происходят в любое время суток.

1.2.3 Обзор ионосферы

Важнейшей характеристикой ионосферы, если рассматривать её с позиции радиосвязи, является её способность преломлять радиоволны. При этом преломление их происходит только в пределах определенного частотного диапазона., который, в свою очередь, зависит от ряда факторов. Было применено несколько методов исследования ионосферы и наиболее часто используемым инструментом для этих целей является ионозонд, рисунок 1.3. Необходимо отметить, что множество ссылок на ионосферную связь говорит о преломлении.

Ионозонд - это высокочастотный радар, отправляющий очень короткие радиоимпульсы вертикально в ионосферу. Если радиочастоты не очень высокие, то они отражаются назад на землю. Ионозонд фиксирует время задержки между передачей и приемом импульса. В конечном итоге, время задержки разных частот определяется по разности частотных колебаний.

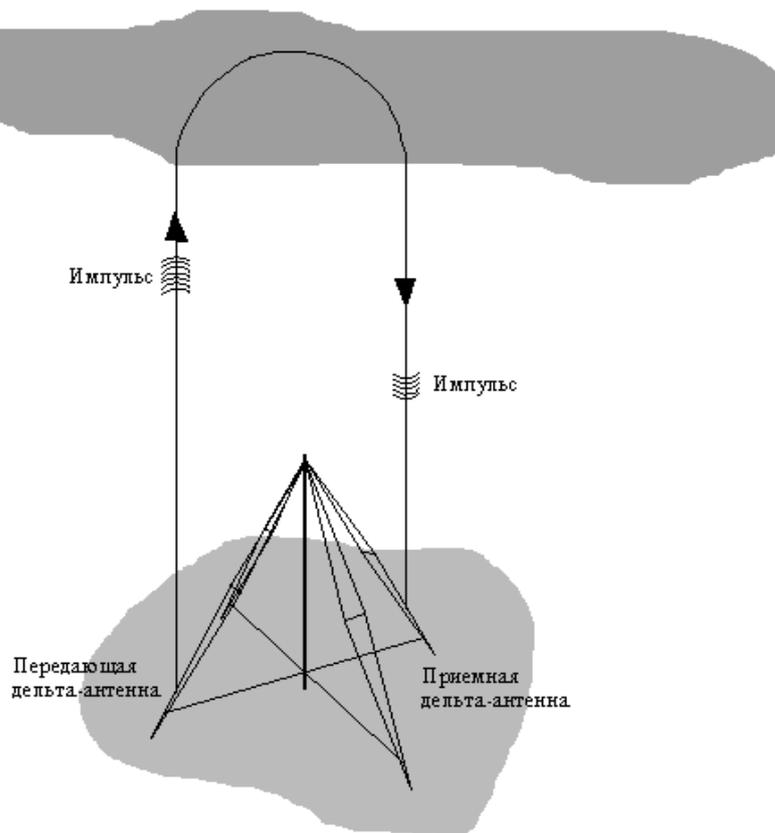


Рисунок 1.3 – Работа ионозонда

Частоты ниже 1,6 МГц вызывают помехи с передающими станциями частотной модуляции. С повышением частоты возникает отражение от нижней области E и, соответственно, имея большую временную задержку, от областей F1 и F2. Конечно, в ночное время отраженные волны возвращаются только от области F2 и, возможно, от спорадической области E, поскольку большинство других областей теряют свои свободные электроны.

В настоящее время ионосфера зондируется не только сигналами направленными вертикально. Наклонные клопферы посылают радиосигналы под углом к ионосфере (передатчик и приёмник находятся на удаленном расстоянии). Подобного рода клопферы имеют возможность отслеживать распространение волн по определенным потокам, на основе чего могут быть сделаны определённые выводы. Ионозонды обратного излучения принимают отраженный от земли сигнал, который попал в приёмник, являющийся и передатчиком в тот же момент. Такой тип клопферов используется в надгоризонтных радарх.

1.2.4 Вариации в ионосфере

Одна и та же частота не может передаваться в течение года или даже суток. Изменение ионосферы происходит в зависимости от сезона и солнечного цикла. Таким образом, частота, успешно распространяющаяся в данный момент, через некоторое время может быть утеряна.

1.2.4.1 Вариации в зависимости от солнечного цикла

Солнце проходит через фазы восхода и заката, влияющие на высокочастотную связь, а продолжительность солнечных циклов составляет от 9 до 14 лет. Чем больше количество радиации, излученной солнцем в периоды максимальной своей активности, тем большее количество электронов в ионосфере возникает, что и позволяет использовать высокие частоты, рисунок 1.4.

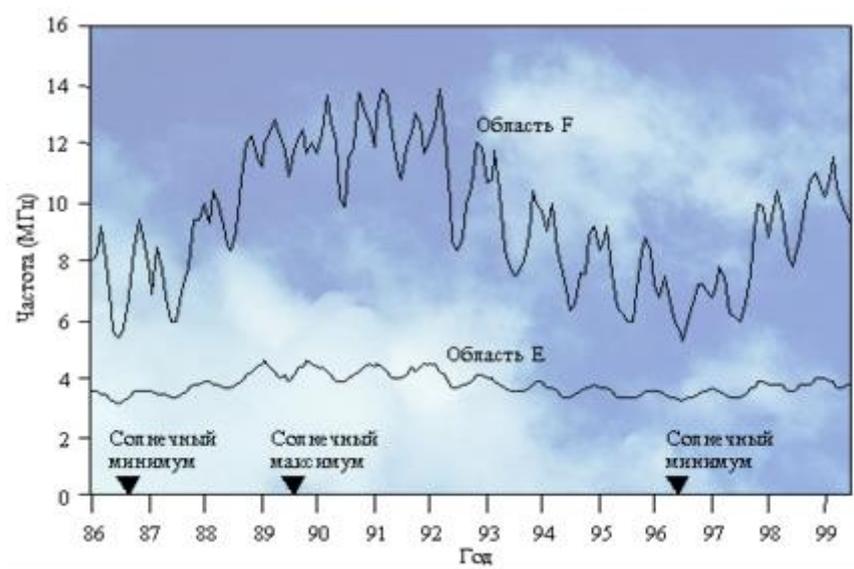


Рисунок 1.4 – Солнечные циклы и сезонная зависимость областей E и F

Существуют и иные последствия солнечных циклов. Есть вероятность огромных солнечных вспышек в период максимальной солнечной активности. Эти вспышки - гигантские взрывы на поверхности солнца, которые излучают радиацию, ионизирующую область D, а это приводит к поглощению высокочастотных волн. Однако область D существует только в дневное время суток, поэтому влиянию подвергается связь, проходящая днём. Поглощение высокочастотных волн, проходящих через ионосферу после солнечных вспышек, называется коротковолновым затуханием. Подобные затухания возникают мгновенно и особенно сильно влияют на более низкие частоты, которые также хуже восстанавливаются. Можно сделать вывод, что если существует подобное затухание, то имеет смысл перейти на более высокие частоты. Но есть вероятность, что во время достаточно большой вспышки весь спектр высокой частоты может оказаться недоступен. В зависимости от интенсивности и продолжительности вспышки, длительность затуханий может варьироваться от 10 минут до часового периода.

1.2.4.2 Сезонные вариации

Частоты области E находятся выше летом, чем зимой. Но в частотах F области вариация более усложнена. В обоих полушариях планеты, частоты в F области в полдень достигают своего максимума во время равноденствий (март

и сентябрь). В момент солнечного минимума летом полуденные частоты обычно в основном выше, чем зимние, но в момент солнечного максимума зимние частоты в некоторых местах могут быть выше, чем летом. Кроме того, частоты в момент равноденствий (март и сентябрь) выше, чем летом или зимой как для солнечного максимума, так и минимума. Наблюдение полуденных зимних частот, более высоких, чем в летнее время, называется сезонной аномалией.

1.2.4.3 Вариации с широтой

В течение дня и с увеличением широты солнечная радиация облучает атмосферу под большим углом, что приводит таким образом к уменьшению интенсивности радиации и плотности электронов к полюсам.

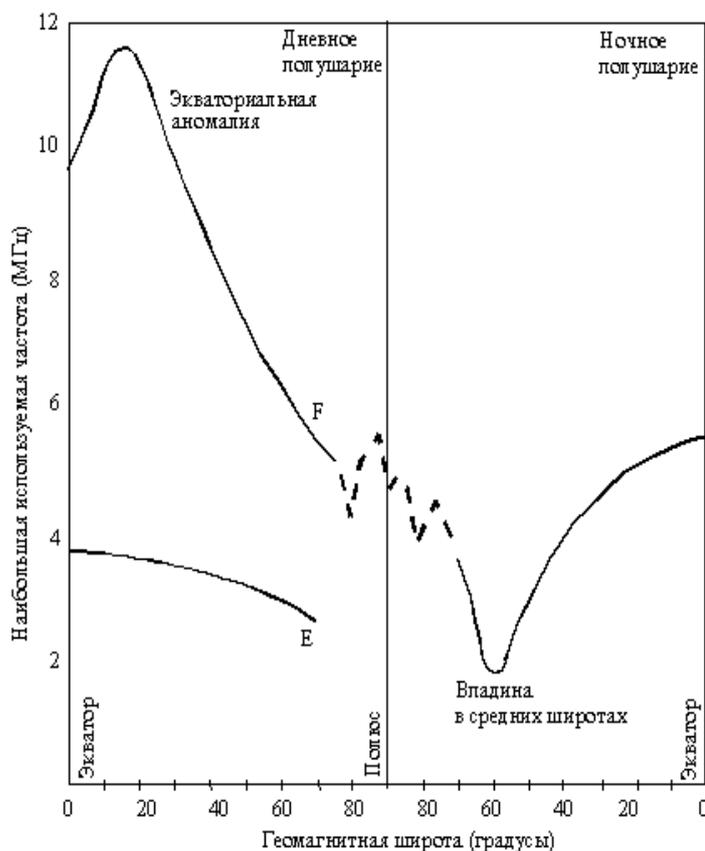


Рисунок 1.5 – График широтных вариаций

Нужно отметить, рисунок 1.5, что дневные частоты области F достигают своего пика не на магнитном экваторе, а в районах, расположенных от 15 до 20 градусов к северу и к югу от него. Это называется экваториальной аномалией. Ночью минимальные частоты наблюдаются в районе 60 широты к северу и к югу от геомагнитного экватора. Это называется впадиной в средних широтах. Около этих районов могут происходить большие отклонения, что приводит к вариациям в диапазоне (дальности) ионосферных волн, которые имеют точки отражения вблизи этих районов.

1.2.4.4 Суточные вариации

Рабочие частоты обычно выше в течение дня и ниже ночью, рисунок 1.6. С рассветом солнечная радиация создаёт электроны в ионосфере, а частота увеличивается, достигая своего максимума к полудню. В течение полудня, из-за электронной потери частоты начинают уменьшаться и с вечером, области D, E, и F1 становятся малозначащими. Ионосферная ВЧ связь вечером более слабая из-за недостатка электронов в области D. В течение ночи, частоты уменьшаются, достигая своего минимума как раз перед рассветом.

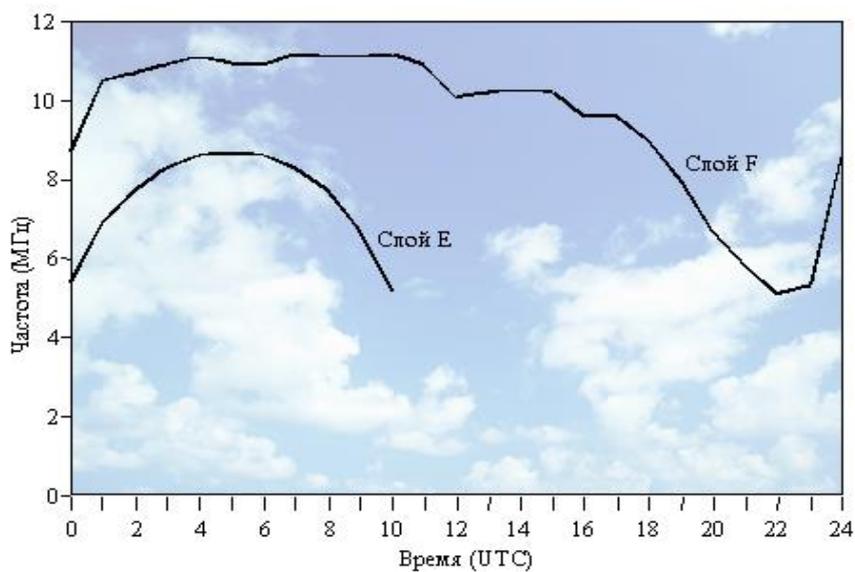


Рисунок 1.6 – Частоты слоев E и F для трассы Сингапур - Хо-ши-Мин

1.2.5 Вариации в поглощении

Поскольку волны проходят через D область, которая становится малозначимой ночью, эта область уменьшает волны. Поглощение в области D также изменяется с солнечным циклом, наибольшее поглощение можно наблюдать в период солнечного максимума. Поглощение сигнала больше летом и в течение середины дня, рисунок 1.7. В зависимости от широты существует вариация поглощения, с большим поглощением около экватора и уменьшающимся к полюсам, хотя некоторая солнечная активность значительно увеличивает поглощение на полюсах. Более низкие частоты поглощаются в большей степени, так что необходимо использовать высокочастотные сигналы там, где это возможно.

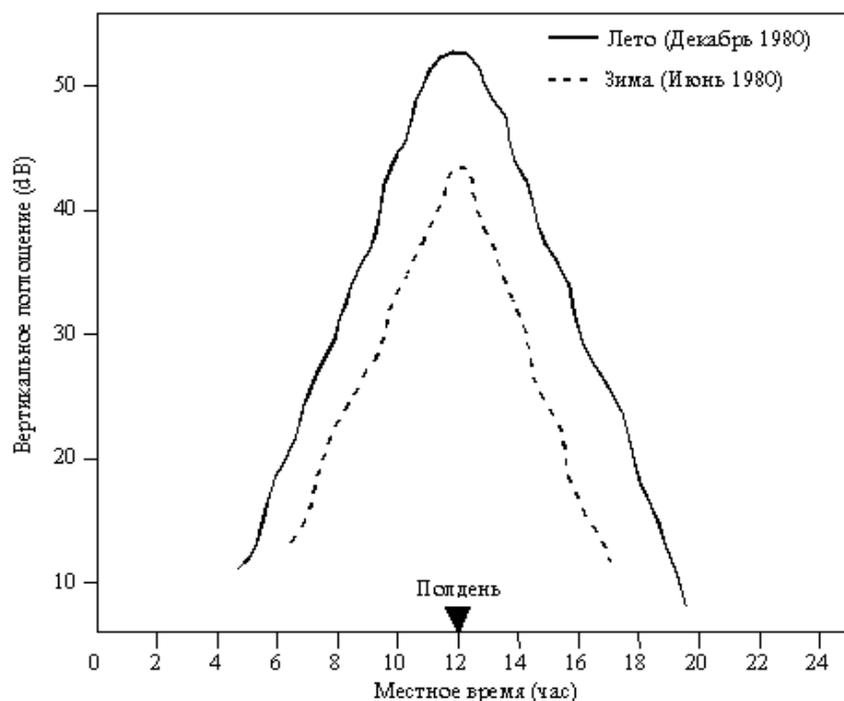


Рисунок 1.7 – Пример суточных и сезонных вариаций в поглощении (Сидней, 2,2 МГц)

Поглощение время от времени может затрагивать связь весьма серьезно вокруг полярных областей. Вырвавшиеся из Солнца протоны высокой энергии в течение больших солнечных вспышек будут двигаться к геомагнитным линиям магнитного поля и в полярные области. Эти протоны могут создавать увеличенное поглощение волн КВ станций, поскольку они проходят через область D. Это увеличенное поглощение может длиться в течение многих дней и называется случаем Поглощения Полярной Шапки (ППШ).

1.2.6 Слой E (спорадический слой)

Спорадический слой E может формироваться в любое время. Это происходит на высотах от 90 до 140 км (в области E), и может распространяться на большую область или быть ограничено небольшой областью. Трудно предвидеть, где и когда это произойдет и как долго это продлится.

Спорадический слой E может иметь сопоставимую электронную плотность с областью F, это означает, что она может преломлять частоты, сопоставимые с областью F. Поэтому спорадическая область E может использоваться для ВЧ связи на более высоких частотах, чем это возможно в нормальном слое E время от времени. Существуют моменты, когда спорадический слой E прозрачен и позволяет большинству радиоволн проходить через него к F области, но в другое время спорадический слой E затеняет область F полностью, сигнал не достигает приемника (затенение слоем). Если спорадический слой E частично прозрачен, то радиоволна будет отражена от области F попеременно со спорадическим слоем E. Это может

приводить к частичной передаче сигнала или постепенного изменения силы сигнала.

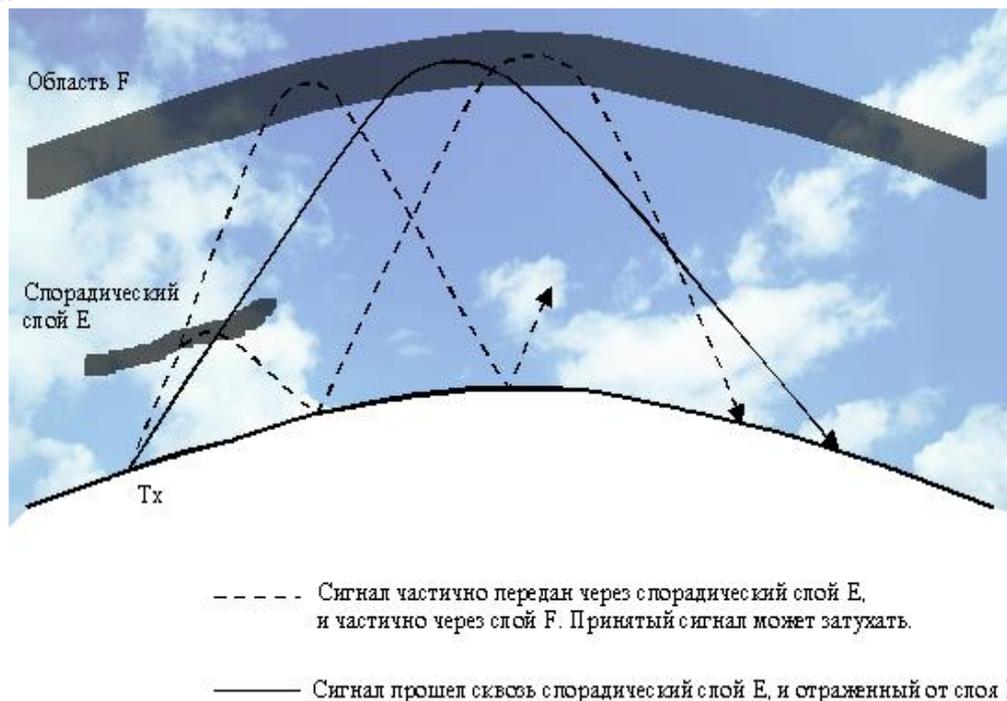


Рисунок 1.8 – Возможные пути распространения радиоволн при наличии спорадического слоя E.

Спорадический E слой на низких и высоких широтах возникает главным образом в течение дня и раннего вечера, и чаще встречается в течение летних месяцев. В высоких широтах спорадический слой E имеет тенденцию формироваться ночью.

1.2.7 Распространение F

Областью F называют теперь всю ионосферу выше 130—140 км. Максимум ионообразования достигается на высотах 150—200 км. Однако вследствие диффузии и относительно долгой длительности жизни ионов образовавшаяся плазма распространяются вверх и вниз от области максимума. Из-за этого максимальная концентрация электронов и ионов в области F находится на высотах 250—400 км.

В дневное время также наблюдается образование «ступеньки» в распределении электронной концентрации, вызванной мощным солнечным ультрафиолетовым излучением. Область этой ступеньки называют областью F1 (150—200 км). Она заметно влияет на распространение коротких радиоволн.

Выше лежащую часть слоя F называют слоем F2.

На больших высотах преобладают более лёгкие ионы кислорода (до высот 400—1000 км), а ещё выше — ионы водорода (протоны) и в небольших количествах — ионы гелия.

Особенностью слоя F является то, что он отражает радиоволны в диапазоне частот от нескольких мегагерц до 10 мегагерц, что делает возможным передачу радиосигналов коротковолнового диапазона на значительные расстояния.

Несмотря на то, что ионный состав слоя F зависит от солнечной активности, его способность отражать электромагнитные волны с частотой, меньшей 10 МГц, стабильна.

1.3 Высокочастотная связь

1.3.1 Типы распространения ВЧ

Высокая частота (от 3 до 30 МГц) радиосигнала может достигать отдаленного приемника, рисунок 1.8, через следующие среды:

- поверхностная волна (волна у поверхности земли), передача на короткие расстояния, приблизительно 50-70 км. Диапазон волны зависит от поляризации, частоты, заземляющих типов, растительности, материкового и/или морского расположения;

- прямая волна или волна прямой видимости: эта волна может взаимодействовать с отраженной землей волной в зависимости от разделения терминала, частоты и поляризации;

- ионосферная волна - радиоволна, возникающая в результате однократного или многократного отражения от ионосферы и приходящая в точку приема под большими углами места. Такая волна может распространяться на огромные расстояния и огибать земной шар.

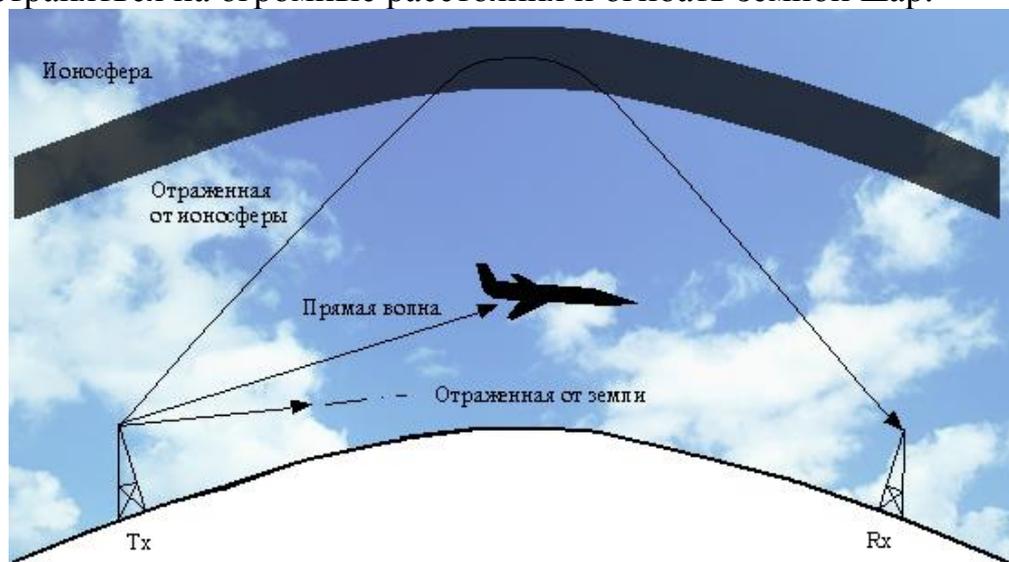


Рисунок 1.9 – Виды распространения радиоволн на KV.

1.3.2 Частотные пределы ионосферных волн

Не все KV-радиоволны будут преломлены ионосферой, существует верхние и нижние частотные границы для связи между двумя терминалами. Если частота слишком высока, волна проникнет через ионосферу, если частота сигнала окажется слишком низкой, сила сигнала будет понижена из-за

поглощения в области D. Диапазон частот, пригодный к использованию изменится:

- в течение дня;
- с сезонами;
- с солнечным циклом;
- в зависимости от ионосферной области, используемой для связи.

В то время как верхний предел частот изменяется главным образом с этими факторами, более низкий предел также зависит и от приемника, трассирующего шума, КПД антенны, мощности передатчика, и поглощение ионосферой.

1.3.3 Частотный диапазон, пригодный к применению

Для любой схемы имеется Максимально Применимая Частота (МПЧ), которая определена состоянием ионосферы около области рефракции и длины цикла. В течение дня возможно связаться и через слои E и F, использующие различные частоты. Самая высокая частота, поддерживаемая слоем E - E МПЧ, в то время как поддерживаемая F слоем - F МПЧ.

МПЧ области F в особенности изменяется в течение дня, сезонно и с солнечным циклом, что отражают данные наблюдаемых частот. Диапазон МПЧ области F можно прогнозировать, и этот диапазон простирается от более низкого уровня МПЧ (называемый Оптимальной Рабочей Частотой, ОРЧ), через медиану к верхнему уровню МПЧ. Эти МПЧ имеют 90 %, 50 % и 10 % шанс, который будет поддержан ионосферой, соответственно. Прогноз СОИ обычно охватывает период одного месяца, так что ОРЧ должна обеспечить успешное распространение волн в течение 90 % времени или 27 дней месяца. Медианная МПЧ должна обеспечить связь 50 % или в 15 дней месяца, а верхний уровень МПЧ - 10 % или 3 дня месяца. Верхний уровень МПЧ - самая высокая частота диапазона МПЧ и наиболее возможная для проникновения через ионосферу, рисунок 1.9.

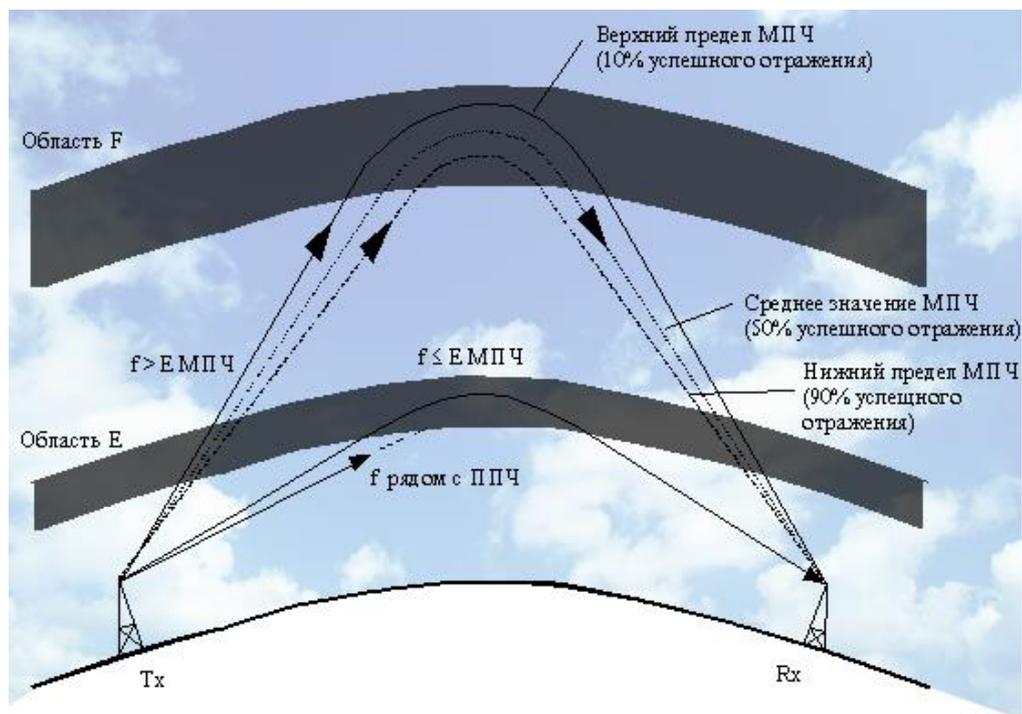


Рисунок 1.10 – Диапазон частот, пригодный к использованию. Если частота f меньше границы ППЧ, то излучение будет поглощено слоем D; если излучение производится с частотой выше ЕМПЧ, то радиоволны распространяются сквозь область E; если частота излучения находится выше МПЧ, то радиоволна проходит сквозь слой F.

Успешное распространение волн, при ежемесячном прогнозе солнечной активности, довольно часто является правильным. Иногда на Солнце происходят непредвиденные события, и ежемесячные прогнозы становятся неточным. Одна из ролей Австралийского Космического Центра Прогнозирования (АКЦП) в СОИ - обеспечить правки в ежемесячных прогнозах, предупреждая клиентов об изменении в условиях связи.

D область не позволяет всем частотам быть использованными, начиная с более низких частот, вероятно, будут поглощены. Поглощающая Предельная Частота (ППЧ) обеспечивается как волновод к более низкому пределу диапазона частот пригодных к употреблению. ППЧ существует только для схем с точками рефракции в освещенном солнцем полушарии. Ночью, ППЧ нулевая, позволяет частотам, которые не пригодны к применению в течение дня, успешно распространяться.

1.3.4 Длина расстояния отраженного скачка

Длина отрезка волны - расстояние пройденное радиосигналом после того, как он был отражен от ионосферы и возвращен к Земле. Верхний предел отрезка волны определяется высотой ионосферы и кривизны Земли. Для областей E и F при высотах 100 км и 300 км, максимальная длинна отрезка волны с углом подъема 4 градуса, являются 1800 км и 3200 км, соответственно. Для покрытия расстояний больше чем эти потребуется

больше чем один отрезок волны. Например, расстояние 6100 км требовало бы минимум 4 отрезка волны для области E и 2 отрезка для области F с таким углом подъема. Прохождение большого количества отрезков может потребовать больший угол подъема у антенн.

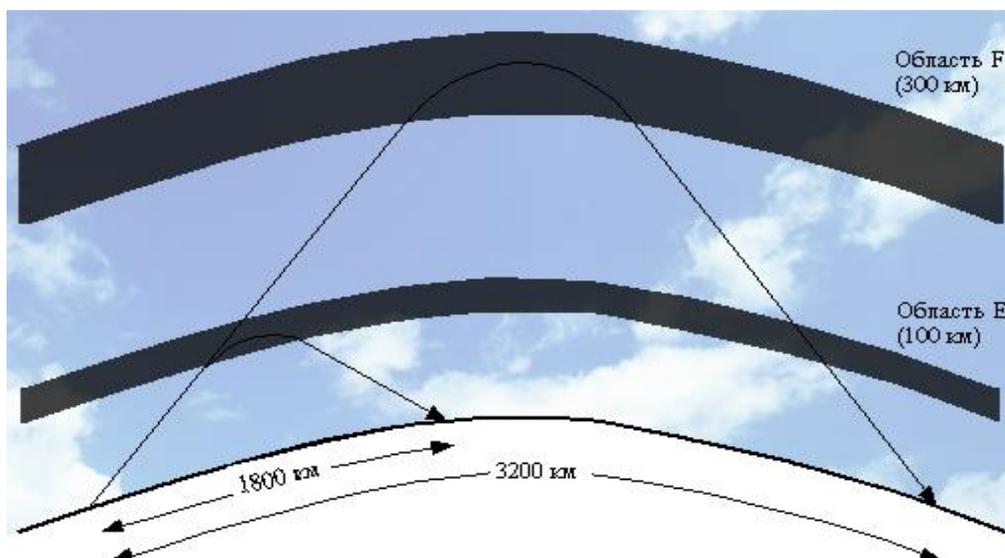


Рисунок 1.11 – Расстояние до следующей точки определяется углом подъема диаграммы направленности антенны.

1.3.5 Варианты распределения радиоволн

Имеются много способов или режимов, посредством которых ионосферная волна может путешествовать от передатчика на приемник. Режим распространения в определенном слое, который требует наименьшего количества отрезков волны между передатчиком и приемником, называется режимом первого порядка. Режим, который требует одного дополнительного отрезка волны, называется режимом второго порядка. Для канала с длиной пути 5000 км, первый порядок режима F требовал бы, по крайней мере, двух отрезков волны (2F), в то время как второй порядок режима F будет тогда требовать трех отрезков волны (3F). Первый порядок режима E имеет то же самое число отрезков волны, как и первый порядок F режима. Если это кончается длиной отрезка больше чем 2050 км, и соответствует углу подъема 0 градусов, режим E распространения не возможен. Это также применяется ко второму порядку режима E распространения. Конечно, режим распространения в области E будет только доступен для связи в дневное время.

Существуют простые режимы распространения в одной области, скажем области F, рисунок 1.11. Более сложные режимы распространения, состоят из комбинаций отражений от областей E и F и системы хордовой и канальной связи, рисунок 1.12.

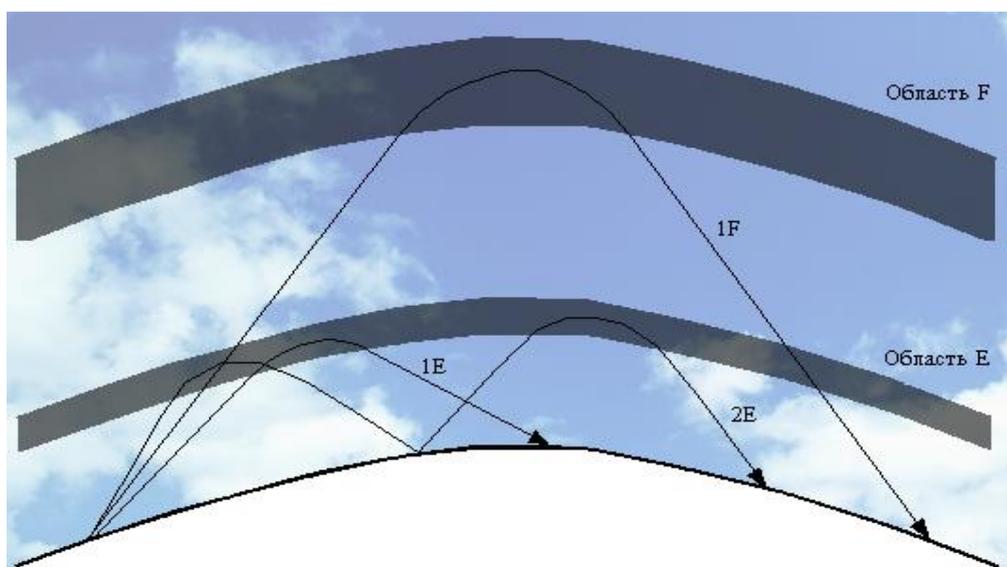


Рисунок 1.12 – Пример простого варианта распространения радиоволн

Хордовый режим и система канальной связи дают множество отражений от ионосферы без промежуточных отражений от земли. Существует мнение, что области ионосферы являются однородной, однако, ионосфера совершает волновое движение и перемещается, с волнами, проходящими через неё, что может затрагивать отражение сигнала. Ионосферные области могут наклониться и, когда это случается, хордовый и канальный режимы имеют место быть. Ионосферный наклон более вероятен близ экваториальной аномалии, желоба средних широт и в секторах заката и восхода солнца. Когда эти типы режимов происходят, сигналы могут быть сильны, так как волна тратит меньшее количество времени, пересекая область D.

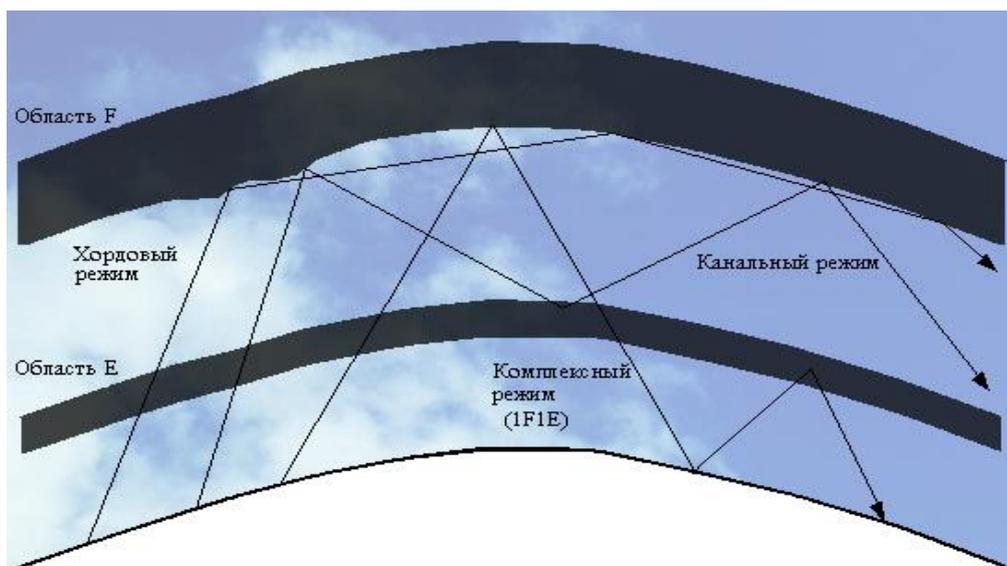


Рисунок 1.13 – Более сложные варианты отражения радиоволн

Из-за высокой электронной плотности дневной ионосферы около 15 градусов магнитного экватора (около экваториальной аномалии), транс экваториальные тракты могут использовать эти повышения, чтобы распространиться на верхних частотах. Любой наклон ионосферы может кончаться хордовым режимом, производя хорошую мощность сигнала по длинным расстояниям.

Система канальной связи может кончаться, если наклон происходит, и волна становится пойманной между преломляющими областями ионосферы. Это наиболее вероятно в экваториальной ионосфере, около вызванной полярным сиянием зоны и желоба средних широт. Возмущения в ионосфере, типа путешествующих ионосферных возмущений, могут также составлять систему канального и хордового режима распространения.

1.3.6 Экранирование E слоя

Для дневных коммуникаций через область F, самая низкая частота пригодная к применению через один отрезок волны режима F (1F) зависит от присутствия области E. Если рабочая частота для режима 1F - ниже двух отрезков ЕМПЧ, то сигнал вряд ли распространится через F область из-за экранирования областью E. Это потому что антенные углы возвышение и режимов 1F и 2E одинаковы.

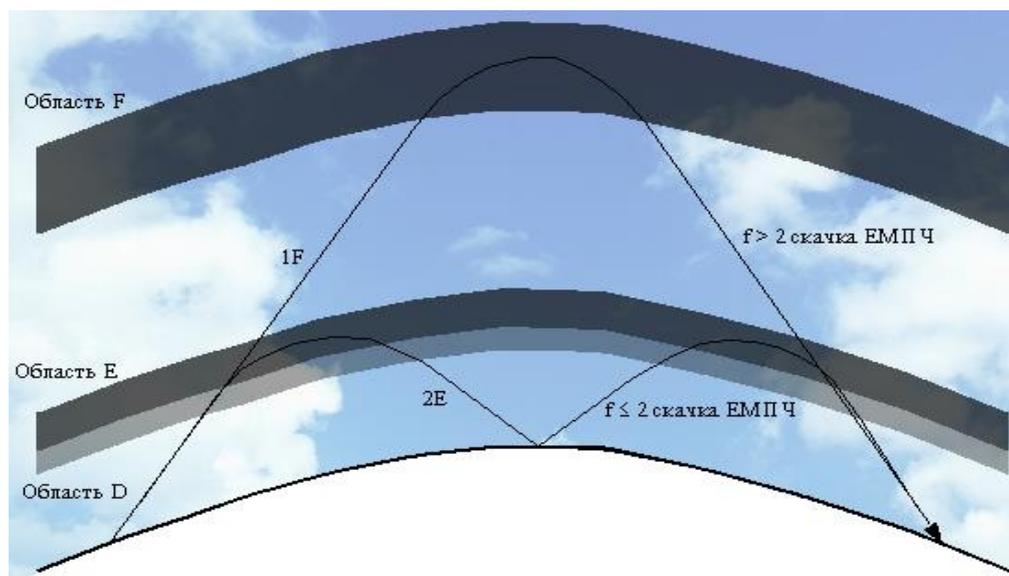


Рисунок 1.14 – Экранирование слоя E происходит при режиме 1F или частотах излучения ниже МПЧ для 2E режима. Обратите внимание, что сигнал проходит область поглощения D.

Спорадический слой E может также экранировать волну от области F. Иногда спорадический слой E может быть весьма прозрачен, позволяя большинству волн пройти через него. В другое время он будет частично экранировать область F, ведущую к слабому или постепенно изменяющему силу сигналу, тогда как в другое время спорадический E может полностью

затенить область F с возможным результатом, при котором сигнал не достигает приемника, рисунок 1.14.

1.4 Коротковолновые затухания

Такие затухания также называются Внезапными Ионосферными Возмущениями (ВИВ). Радиация от Солнца в течение больших солнечных вспышек приводит к повышению ионизации в области D, которая приводит к большому поглощению волн КВ-диапазона. Если вспышка достаточно большая, то весь спектр ВЧ может быть непригодным на время. Затухания, более вероятно, происходят при солнечном максимуме и в первой части снижения к солнечному минимуму.

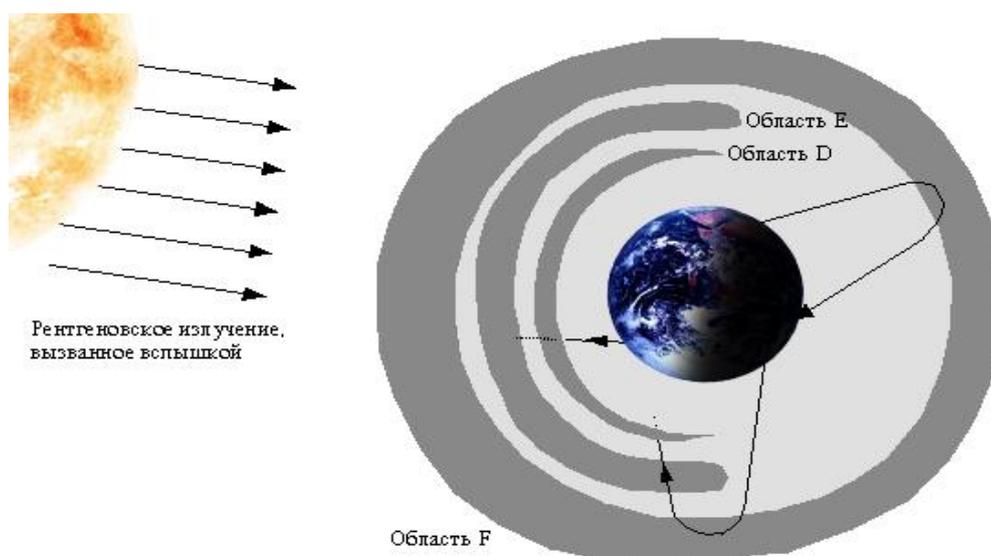


Рисунок 1.15 – Затухания затрагивают только те пути, где волна проходит через область D, т.е. каналы с дневными секторами. Ночные каналы не затронуты затуханиями.

Главные особенности КВ затуханий:

- Затухания обычно длятся от нескольких минут иногда два часа, с быстрым началом и более медленным восстановлением. Продолжительность затухания будет зависеть от интенсивности и продолжительности вспышки;
- Величина затухания будет зависеть от мощности вспышки и положения Солнца относительно точки, где радиоволна проходит через область D. Чем выше Солнце относительно той точки, тем большее количество поглощения;
- Поглощение самое большое в более низких частотах, которые являются первыми при воздействии на них и последние при восстановлении. На верхние частоты обычно воздействие меньше, и они могут быть годны к применению, рисунок 1.15.

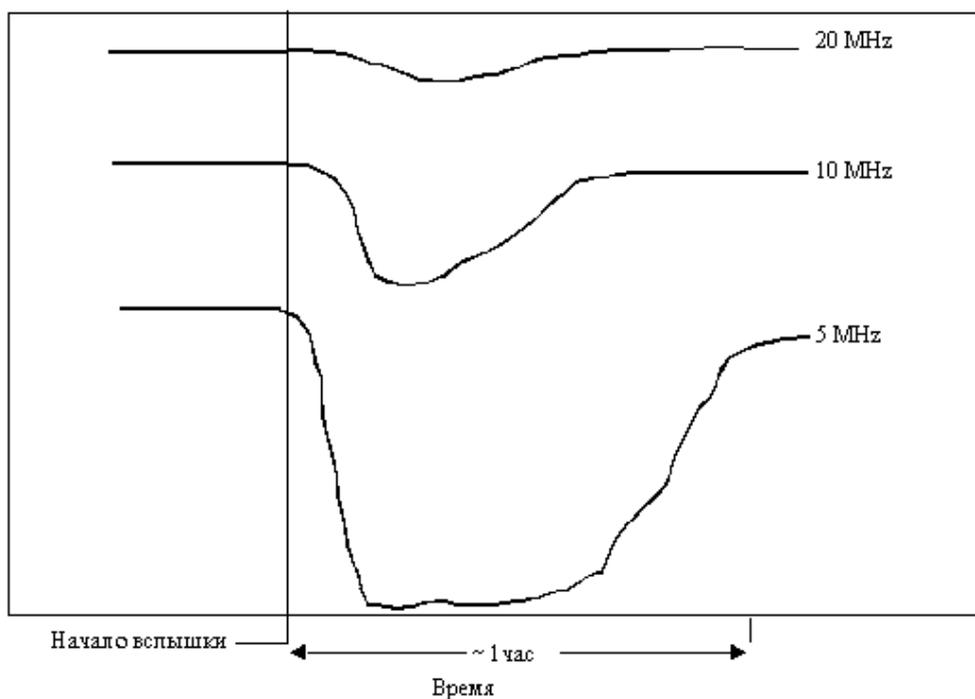


Рисунок 1.16 – Затухания затрагивают главным образом низкие частоты. Высокие частоты затухает гораздо меньше, и восстанавливаются быстрее

Поглощение Полярной Шапки (ППШ) относят к протонам высокой энергии, которые отрываются от Солнца, когда происходят большие вспышки, двигаются по линиям магнитного поля Земли к полярным областям. Там они ионизируют область D, приводя к ослаблению КВ сигналов, проходящих через эту область. ППШ наиболее вероятно в момент солнечного максимума, однако, оно выступает не столь частым явлением как затухание.

- ППШ может начинаться через 10 минут после вспышки и длиться для до 10 дней;

- Эффекты ППШ могут иногда преодолеваются, ретранслируя сообщения на каналах, которые не требуют полярных точек рефракции;

- Даже зимой полярная зона может переносить эффекты ППШ. Частицы от Солнца могут фактически создавать ночью область D.

Очень крупные солнечные вспышки сопровождаются помимо усиления волнового излучения выбросами энергичных протонов с энергиями в десятки мегаэлектронвольт и более. Такие вспышки называют протонными, а их высокоэнергичное корпускулярное излучение – солнечными космическими лучами (СКЛ). Последние соержжат помимо протонов α -частицы и в незначительных количествах более тяжелые частицы, а так же электроны. Протоны с энергиями $E \geq 20 \text{ МэВ}$, вторгаясь в нижнюю ионосферу и ионизуя D-область, вызывают поглощение радиоволн, характеризуемое уменьшением интенсивности принимаемого на Земле космического радишума и ростом f_{\min} – минимальной частоты радиоволн, отраженных от ионосферы при ВЗ. Вплоть до полного отсутствия радиоотражений на ионограммах (так называемые блэкауты). По данным сети риометров было установлено, что

поглощение в периоды протонных вспышек ограничено приполюсными областями ($\Phi > 65^\circ$), поэтому явление получило название ППШ (его именуют так же SPE – solarprotonevent).

Локализация явления в полярных областях обусловлена низкой плотностью частиц в потоке СКЛ, позволяющей считать их невзаимодействующими и подчиняющимися теории Штермера и ее модификации, учитывающей недипольность геомагнитного поля. Согласно этой теории заряженные частицы энергией в несколько мегаэлектронвольт, направляющиеся из бесконечности к Земле, обладающей дипольным магнитным полем, могут приближаться к ее поверхности лишь в приполюсных областях из-за отклоняющего действия силы Лоренца. Широта обрезания Φ_c , ниже которой частица не может проникнуть к Земле, определяется ее жесткостью G :

$$G = p_\alpha \frac{c}{e_\alpha} = R_\alpha B,$$

где p_α и e_α - импульс и заряд частицы;

R_α – гирорадиус;

B – магнитное поле.

Чтобы частица попала на широту обрезания Φ_c , нужно, чтобы ее жесткость превышала величину

$$G_e = 14,7 \cos^4 \Phi_c.$$

В дипольном поле на широте $\Phi \sim 65^\circ$, до которых реально может простираться ППШ, в состоянии проникнуть лишь протоны с энергиями $E \geq 100$ МэВ, однако фактические пороговые энергии меньше соответствующих из-за отличия реальной конфигурации геомагнитного поля от дипольной.

Обычно СКЛ, ответственные за ППШ, генерируя при вспышках, сопровождаемых интенсивными всплесками солнечного радиоизлучения. Их приход и соответственно время начала ППШ задержаны относительно момента начала вспышки на время от 20 минут до нескольких (~20) часов. Эта задержка определяется не только энергией протонов, но и длиной пути их распространения от Солнца, которое происходит вдоль сложных траекторий, зависящих от места вылета и характера силовых линий ММП. Неоднородности последнего препятствуют распространению СКЛ к земле и способствуют их изотропизации. С этим обстоятельством связано также то, что длительность ППШ значительно превышает длительность вспышки и составляет от десятков часов до нескольких суток и то, что с ростом солнечной активности длительность задержки увеличивается.

Увеличение электронной концентрации в области D в периоды ППШ.

Наиболее осязаемое увеличение в самой нижней ее части

($h \approx 50 - 70 \text{ км}$), может превосходить эффекты волнового (рентгеновского) излучения сильных вспышек. Учитывая, что длительность ППШ много больше длительности ВИБ и явление развивается не только на дневной, но и на ночной стороне Земли, его следует считать наиболее значительным типом возмущений высокоширотной нижней ионосферы. Ночью, однако, интенсивность ППШ примерно в 5 раз меньше, чем днем, из-за уменьшения содержания свободных электронов ночью вследствие замедления их отлипания от отрицательных ионов.

В установленной связи максимального потока протонов с $E > 10 \text{ МэВ}$ со средней продолжительностью T (в мин) солнечных радиовсплесков в диапазоне 8 – 20 ГГц и интенсивностью ППШ:

$$J_m(E > 10 \text{ МэВ}) = 1,0 \cdot 10^{-2} T_m^5 = 50 A^2,$$

где A – дневное поглощение на частоте 30 МГц при вертикальном падении радиоволн.

Из-за явлений на Солнце, иногда магнитное поле Земли становится нарушенным. Геомагнитное поле и ионосфера связаны довольно сложно, и возмущение в геомагнитной поле может часто причиняет возмущение в области F ионосферы.

Такие ионосферные бури иногда начинаются с увеличенной электронной плотности, позволяющей поддерживать верхние частоты, сопровождаются уменьшением в электронной плотности, ведущей к успешному применению только более низкие частоты области F. Повышение обычно не будет касаться КВ частот, а понижение плотности может приводить к проникновению через ионосферу частот, обычно используемых для связи.

Ионосферные бури могут длиться в течение многих дней и воздействуют на средних, и высоких широтах намного сильнее, чем на низких широтах. В отличие от затуханий, на верхние частоты больше всего воздействуют ионосферные бури. Чтобы сократить эти эффекты, необходимо стремиться к использованию более низких частот.

Ионосферные бури могут происходить во время всего солнечного цикла, и связаны с Массовым Выбросом Короны (МВК) и щелями в короне на Солнце.

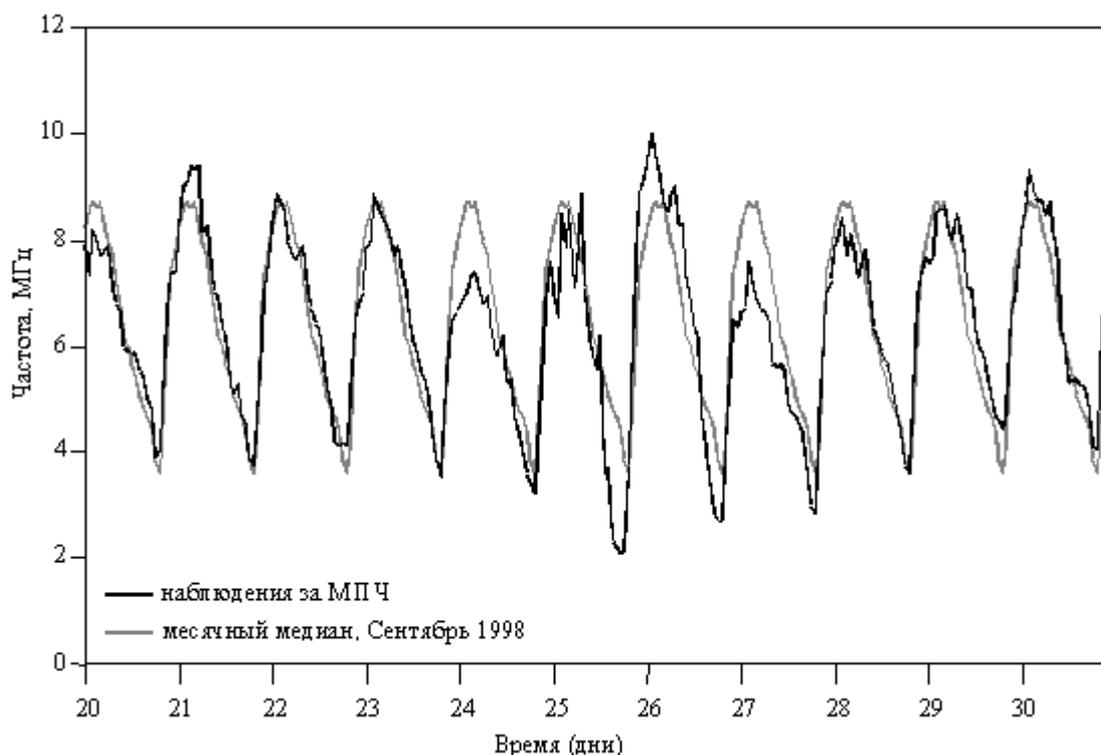


Рисунок 1.17 – График влияния ионосферной бури на частоты станции в Канберре, Австралия. Верхние частоты были бы вероятно неприменимы в течение этого времени.

Потоки частиц вещества — преимущественно плазмы, атомных ядер и элементарных частиц, обладающие значительными скоростями, весьма, однако, далекими от скорости света. Сюда относятся альфа-лучи и бета-лучи, испускаемые радиоактивными элементами, космическое излучение, корпускулярная радиация Солнца, радиационный пояс атмосферы. Следует всегда помнить, что К. Р. — явление совершенно иное, чем электромагнитная радиация.

1.5. Космическая погода

К космической погоде можно отнести динамическую часть солнечно-земных связей (от суток и меньше), а по аналогии с земными процессами более стационарная часть часто называется «Космическим климатом». Сейчас мы рассмотрели космическую погоду с научной точки зрения. На практике же к теме космической погоды можно отнести, к примеру, проблемы прогнозирования активностей (солнечной и геомагнитной), необходимость исследования влияния солнечных факторов на системы технического устройства (радиопомехи, радиационные фоны и так далее), а также воздействия на биологические системы и людей.

А. Л. Чижевский (начало XX века) стал одним из основателей понятия и выражения «космическая погода», упомянув их в одной из своих публикаций. Его работа, опубликованная на конгрессе биофизиологии стала официальным признанием нового научного направления. Достижения в работе над основами

гелиобиологии сыграли главную роль в его избрании почётным членом Академии наук США в 1927 году, представив его как основателя изучения оказываемого влияния на биосферу и ноосферу космической погоды (психофизиологию и социальные процессы).

Ионизирующее излучение (или иначе «космическая радиация») — есть потоки мельчайших элементарных частиц, электромагнитных квантов и ядер в весьма широком диапазоне энергий. Их взаимодействие с веществом приводит к ионизации его атомов и молекул, приводя к разрушению атомной и молекулярной структуры вещества. Радиация влечет за собой негативные последствия, аффицируя как в работе технических устройств, так и в функционировании биологических объектов.

Основными важными для практики источники ионизирующего излучения являются:

- галактические космические лучи (ГКЛ), энергетический спектр которых доходит до 10^{19} эВ/нуклон;
- солнечные космические лучи, существующие в диапазоне энергий до 1000 МэВ);
- электроны радиационных поясов Земли, в диапазоне до 10 МэВ;
- ионы радиационных поясов Земли, диапазон до 400 МэВ;
- солнечные кванты рентгеновского и гамма излучений.

Стоит также упомянуть, что к наиболее радиационно-опасным частицам нужно отнести те, что существуют с энергиями более 30-50 МэВ.

Основным механизмом передачи энергии веществу здесь приходится ионизационные потери (что истинно для большинства типов космической радиации). Иными словами, осуществляется вырывание электрона с внешней оболочки атома за счёт переданной ему части энергии налетающей частицы. Также осуществляется генерация электронно-дырочных пар в веществе. Помимо всего, касательно частиц с энергией, превосходящей границы в несколько сотен МэВ/нуклон, осуществимы ядерные реакции, влекущие за собой значительное вторичное излучение (фрагменты ядер, нейтроны, мезоны и гамма-кванты), которое также должно быть учтено при анализе радиационной обстановки.

Только благодаря наличию ионосферы становится возможным существование многих видов радиоволн и их применение для радиосвязи. Возмущения ионосферы различного типа оказывают значительное влияние на распространение радиоволн вплоть до их отражения или полного поглощения. Как результат, в течение длительного времени радиосвязь между удаленными регионами на Земле имеет шанс подвергаться сильным помехам или вовсе отсутствовать в некоторых частотных диапазонах.

При активных процессах на Солнце происходит изменение текущего состояния ионосферы, что происходит за счет роста потока ионизирующего излучения от Солнца. Причем рост излучения может быть как электромагнитного (в основном представленного рентгеновским, гамма и ультрафиолетовым излучением, достигающим Землю время, составляющее

около 8 минут), так и корпускулярного, представленного солнечными космическими лучами, достигающими Землю за время, рознящееся от нескольких десятков минут и доходя до суток, а также за счет роста геомагнитной активности.

Солнечный ветер представляет собой поток плазмы, около 10⁹ кг/с, истекающий в межпланетное пространство из солнечной короны. В основном состоит из электронов, протонов и ядер гелия, плотность которых среднем около 4 %. Гелиосфера формируется за счет вытеснения межзвездной плазмы солнечным ветром из области с радиусом около 100 а. Е..

Одним из важных внешних факторов инициации возникновения аномалий на космических аппаратах приходится высокоэнергичная корпускулярная радиация космического пространства.

Испускаемая солнечной атмосферой или короной корпускулярная радиация удаляется от Солнца со скоростью, доходящей до сотен и тысяч километров в секунду. Существует три типа КРС:

1) солнечное космическое излучение, происходящее во время сильных вспышек, несущее в потоке, помимо ядер гелия, ядра и протоны тяжелых элементов, нейтроны и электроны;

2) солнечные корпускулярные потоки, истекающие из наиболее активных участков солнечной атмосферы, в составе которых ядра гелия и электроны, вызывают в атмосфере Земли полярные сияния и магнитные бури;

3) солнечный ветер, являющийся равномерным истечением плазмы, в составе которого преобладают протоны, из солнечной короны.

Вызванная солнечными приливами в дневной ионосфере в эпоху минимума солнечных пятен, система ионосферных токов на высотах около 100 км связана с суточной вариацией магнитного поля Земли, иначе говоря - Sq вариация. Общая картина такова, что Земля как бы вращается под этой системой токов. С интервалом в один час проводятся меридианы. Токи текут в направлении стрелок и выражаются в единицах по тысяче ампер каждая на интервал между изолиниями.

Внезапный импульс в Н-составляющей магнитного поля, наблюдаемый на магнитограммах станций, которые находятся дневной стороне земли Земли, называется магнитным крошэ. Возникает оно как следствие прироста ионосферного тока, вызванное увеличением проводимости ионосферы, которое вызвано прибытием всплеска кв-излучения от солнечной вспышки. Примерно через 8 минут ультрафиолетовое и рентгеновское излучение вспышек достигает земной атмосферы, дополнительно ионизируя ее, создав этим самым электрические токи на стороне ионосферы, обращенной к Солнцу.

Изменение геомагнитного поля Земли примерно на 50 нТл (нанотеслы) вызывается магнитным полем Земли, и длится данный эффект около получаса. На непрерывных записях всех трех составляющих геомагнитного поля обнаруживаются внезапные возмущения малой амплитуды, что подтверждает то, что крошэ создаётся внезапным увеличением Sq – токов.

Эффект достигается только при ультрафиолетовом излучении, что доказывается тем, что крошэ наблюдается только на освещенном полушарии и одновременно с достаточно интенсивными вспышками.

ГКЛ, или иначе - галактические космические лучи, имеют в своём составе: ядра разнообразных химических элементов, представленных кинетической энергией E в несколько десятков МэВ/нуклон; электроны и позитроны с кинетической энергией $E > 10$ МэВ. Такие частицы прибывают из межзвёздной среды в межпланетное пространство. К тому же, наиболее вероятными источниками ГКЛ приходится образующиеся пульсары и служащие тому причиной вспышки сверхновых звёзд. Заряженные частицы ускоряются электромагнитными полями - полями пульсаров, после того рассеиваясь на межзвёздных магнитных полях. Вероятно, однако, и то, что частицы, относящиеся к области $E < 100$ МэВ/нуклон) образуются за счет ускорения в межпланетной среде частиц межзвездного газа и солнечного газа. Степенной характер носит дифференциальный энергетический спектр галактических космических лучей.

Для данной магистерской работы также необходимо рассмотреть эффект Форбуша. Поток ГКЛ в области возмущений солнечного ветра в межпланетном пространстве, причиной которых послужили вспышки, согласно наблюдениям, может уменьшаться до 50%. Уменьшение может достигнуть 25–30% в атмосфере Земли на высотах в десять-двадцать километров. Именно это явление называется Форбуш-эффектом или, иначе, Форбуш-понижением. Будучи связанным обычно с геомагнитной бурей, такое понижение происходит примерно на сутки. Рассеяние галактических космических лучей на магнитных полях, переносимых солнечным ветром, усиленным вспышками на Солнце, вызывает данный эффект.

Плотность энергии солнечных облаков довольно велика и может исказить межпланетное магнитное поле, которое, как следствие, сдавливает несущийся поток плазмы и приводит к образованию фронта ударной волны. Эта область, будучи сжатой, становится отражателем для галактических космических лучей, но солнечным протонам позволяет легче достигать Земли. Резкое снижение уровня галактических космических лучей ослабляет скорость образования аэрозоля (различные молекулярные соединения, пыль и твердые частицы), который определяет оптическую прозрачность нижней атмосферы, вследствие чего последняя становится прозрачнее. Как результат, происходит увеличение притока энергии излучения в видимой области спектра примерно на 76%, что приходится на широты выше 60° .

Особенно часто спустя день после прохождения крупных солнечных пятен через центральный меридиан Солнца наблюдаются полярные сияния. Принципы развития отдельных полярных сияний и магнитных бурь совпадают.

Точные математические модели, описывающие процессы солнечно-земной физики, в настоящее время отсутствуют. Как следствие - в основу прогнозов вкладываются феноменологические, вероятностные модели, т.е. модели,

описывающие физические явления, последовательно идущие друг за другом, каждый шаг которой может выполняться со значением вероятности меньше 100%. Вероятность же реализации полной цепочки может быть ниже порога, если её возможно учесть на практике.

Используется 27-45-суточный, 7-суточный, 2-суточный и 1-часовой прогноз. В каждом из этих видов прогнозов используется разность в скорости электромагнитного сигнала и скорости распространения возмущения, и упор ставится на локальное измерение вблизи Земли или дистанционное наблюдение явления на Солнце. Рассмотрим каждый из них детальнее:

1-часовой прогноз основан на прямых измерениях параметров плазмы и магнитного поля на космических аппаратах, дислоцирующихся, обычно, вблизи линии Солнце-Земля в передней точке Лагранжа L1 на расстоянии 1.5 млн. км от Земли;

2-суточный прогноз основан на текущих наблюдениях Солнца, когда вблизи центрального меридиана имели место явления, влекущие за собой возмущения в околоземном пространстве, возмущения плазмы от Солнца к Земле распространяются в среднем от полутора до пяти суток, солнечные космические лучи — несколько часов..

7-суточный прогноз основывается на текущих наблюдениях Солнца вблизи восточного лимба и дает возможность предсказать возмущения Солнца, в случае, когда область вблизи лимба переместится к центральному меридиану (линии Солнце-Земля).

27-45-суточный прогноз основан на текущих наблюдениях Солнца и предсказывает возмущения на Солнце в промежуток времени, когда через оборот Солнца в сторону Земли будет обращена та же сторона Солнца.

Оценка надежности 2-суточного и 1-часового прогноза составляет, соответственно, около 30-50 % и 95 % правильности предсказания. Остальные прогнозы имеют ограниченное практическое применение и носят лишь общий информационный характер.

2 Экспериментальная часть

2.1 Распространение волн в ионосфере

Возрастание солнечной активности приводит ко многим эффектам, поэтому ионосферное распространение может испытывать различные кратковременные возмущения. Во время некоторых геомагнитных бурь, называемых ионосферными, может происходить разрушение ионосферы, что приводит к различным эффектам. Как правило, затрагивается распространение коротких волн через ионосферную область F (на высоте около 300 км). Эти возмущения нарушают электронную конфигурацию ионосферы и вызывают ухудшение или даже полное исчезновение прохождения радиоволн.

Геомагнитные возмущения, приводящие к возникновению авроры, могут фактически улучшить распространение на высокочастотных КВ-диапазонах. Наряду с видимой авророй может возникать и радиоаврора. Это своего рода флуоресценция ионосферного слоя E, которая приводит к возникновению тенденции отражения радиосигналов на частотах примерно выше 20 МГц.

Существуют и ионосферные бури. Ионосферные бури вызываются различными процессами на Солнце, такими как солнечные вспышки, корональные дыры и корональные извержения масс. Бури длятся от нескольких часов до нескольких дней и иногда повторяются с периодом 27,5 дня, равным периоду собственного вращения Солнца.

Сила бури отмечается индексами A и K, которые указываются в радиовещательных сигналах геофизической тревоги Geoalert, передаваемых станциями WWV и WWVH, принадлежащими Национальному институту стандартов и технологий США (NIST) в г. Боулдер, шт. Колорадо. Радиостанция WWV располагается в окрестностях Форт-Коллинза (Ft. Collins), а радиостанция WWVH – в Кауаи, Гавайи. Обе станции осуществляют непрерывное вещание на частотах 2,5; 5; 10 и 15 МГц; кроме того, WWV вещает и на 20 МГц. Информация обновляется каждые три часа и передается станцией WWV на 18-й минуте каждого часа, а станцией WWVH – на 45-й минуте каждого часа. Ионосферные и магнитные возмущения могут сопровождаться видимой авророй.

Индекс K представляет собой результат трехчасовых магнитометрологических измерений интенсивности и направления геомагнитного поля и сравнения их с этими же характеристиками в геомагнитно «спокойных» условиях. Измерения индекса K осуществляются во многих местах земного шара и тщательно согласуются с геомагнитными характеристиками места, в котором проводятся измерения. Индексы K станции Боулдер (Boulder) измеряются по шкале от 0 до 9.

Индекс A дает усредненную меру геомагнитной активности, полученную из ряда физических измерений, долговременную картину

геомагнитной активности. Он выводится из индексов K и принимает значения от 0 до 400.

Многие организации принимают участие в предсказаниях солнечных циклов и в мониторинге солнечной активности. Например, солнечная и гелиосферная обсерватория (SOHO) – это реализованный совместный проект Европейского космического агентства (ESA) и Национального управления по океану и атмосфере (NOAA). Эта космическая станция – наиболее претенциозный проект, позволяющий осуществлять непрерывное наблюдение за Солнцем. Реализация проекта позволяет лучше понять взаимодействие между Солнцем и Землей, включая солнечный ветер.

Огромное число данных о солнечной, геомагнитной и ионосферной активности и об условиях распространения волн можно найти во Всемирной паутине. Большинство web-сайтов спонсируются хорошо известными академическими, педагогическими и правительственными организациями:

- Национальный центр геофизических данных NGDC (National Geophysical DataCenter);
- Информационное агентство по солнечно-земным связям STD (Solar Terrestrial Dispatch);
- Австралийский центр прогнозирования состояния космоса (Australian Space Forecast Center);
- Мичиганский технологический университет и прочие.

2.2 Описание спектроанализатора БАРС

2.2.1 Назначение изделия

Для наблюдения и измерения относительно распределения энергии электрических (электромагнитных) колебаний в полосе частот используется многоканальный анализатор спектра «Барс» - далее по тексту Изделие. Он предназначен для мониторинга спектра, научных исследований и лабораторных испытаний.

Сам прибор представляет собой мобильное средство, защищенное корпусом кейса.

Технические характеристики изделия в основном зависят от его конфигурации и версии используемого программного обеспечения. Характеристики используемого анализатора:

- | | |
|-------------------------------|----------------------------|
| - диапазон частот | от 1 Гц до 4,4 (12,4) ГГц; |
| - динамический диапазон | -151 ±10 дБм; |
| - разрешение по частоте (RBW) | от 0,1 Гц до 250 кГц; |
| - точность измерения уровней | 0,25 дБ; |
| - скорость сканирования | 140 МГц/с; |
| - количество каналов | 5 |

2.2.2 Устройство и работа

Изделие представляет собой переносной блок, совместивший в одном корпусе – как модули анализаторов спектра, так и ноутбук. Наглядный пример

представлен на рисунке 2.1, где предоставлен блок в закрытом мобильном и в открытом рабочем виде.



Рисунок 2.1 – Внешний вид Изделия

В качестве модулей измерителей спектра в анализаторе используются изделия SA44B (1Гц-4,4 ГГц, всегда устанавливается на первом канале) и SA124B (100 кГц-12,4 ГГц).

Многоканальный анализатор спектра «Барс» поддерживает работу как одного канала в отдельности, так и работает в многоканальном режиме.

Одноканальный режим (используется только первый канал и соответствующее программное обеспечение) предназначен для поиска радиосигналов и оценки их характеристик. Изделие позволяет производить измерение спектров и демодуляцию радиосигналов.

В многоканальном режиме изделие может снимать спектрограммы заданных оператором участков спектра периодически, через интервалы времени, которые можно задавать с точностью до одной секунды с записью результатов в базу данных на всех имеющихся каналах независимо друг от друга. В расширенных версиях кроме спектрограмм возможна запись в базу данных временных фрагментов квадратурных составляющих радиосигналов заданных частот, привязка их к всемирному времени по часам приёмника GPS.

2.2.3 Тестирование многоканального анализатора спектра «БАРС»

Для установления идентичности измерений и относительных коэффициентов усиления во всех диапазонах частот (10-30 кГц с полосой частот 3 Гц; 100 – 1000 кГц с полосой 300 Гц; 1,0 – 10,0 МГц с полосой 3,0 кГц и 10,0 – 100,0 МГц с полосой 30,0 кГц) проведены поочередные пробные измерения в каждом канале.

Выбраны диапазоны спектрального обзора в первом канале на частотах ОНЧ 10-30 кГц с полосой частот 3 Гц (СВ-диапазон). Установлено, что в СДВ-диапазоне работают станции GBR 16 кГц, 25 кГц – передача точного времени, планируются измерения работы HAARP для последующих

исследований воздействия мощных излучений СДВ на погоду и другие геофизические катаклизмы.

Проведены измерения во втором канале для диапазона частот 100 Гц – 1 МГц с полосой 300 Гц (ДВ- и СВ-диапазон), определены периодичности работы радиостанций и произведён выбора частот постоянных наблюдений.

Проведены измерения в третьем канале для диапазона частот 1,0 – 10,0 МГц с полосой 3,0 кГц (КВ-диапазон), определены периодичности работы радиостанций и выбраны частоты постоянных наблюдений.

Проведены измерения в четвёртом канале для диапазона частот 10,0 – 100,0 МГц с полосой 30,0 кГц (УКВ-диапазон) для определения периодичности работы радиостанций и выбора частот постоянных наблюдений.

2.3 Проведение эксперимента

На рисунке 2.2 показано, каким образом была выбрана исследуемая частота. Для выбора рабочих частот были построены частотные характеристики КВ диапазона за 1 сутки. Данные отбирались каждые три часа. Критерием выбора послужило наличие сигнала уровня выше -80 дБм в течение всего времени, что характеризовало бы выбранную станцию как работающую круглосуточно. Все, что принималось в пределах от -120 до -100 дБм отбрасывалось как шум.

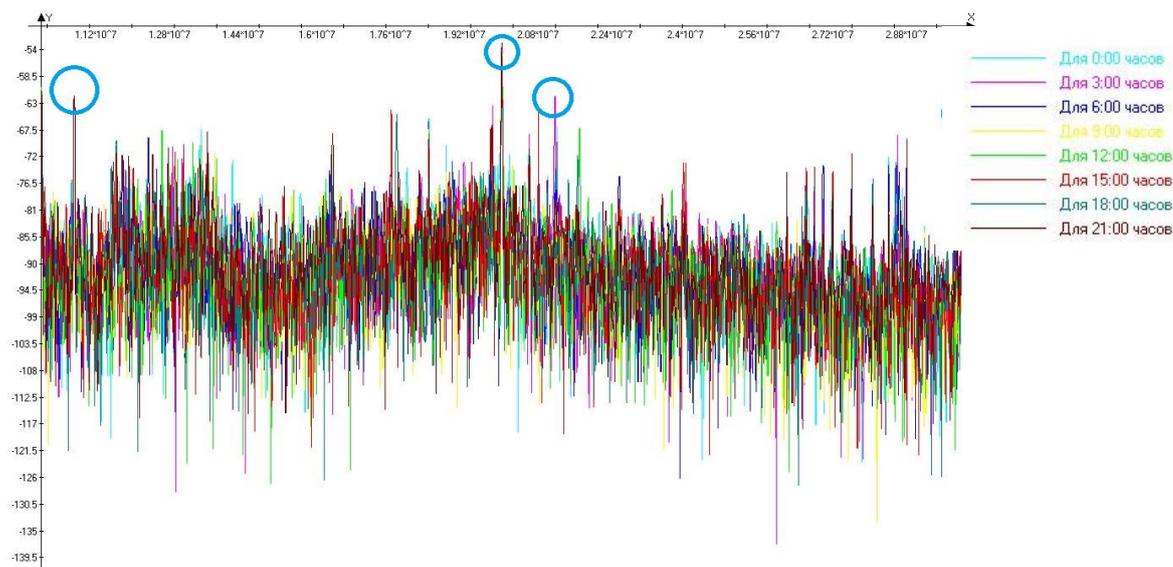


Рисунок 2.2 – Спектрограмма занятости эфира

С помощью доступного приложения программного обеспечения Advanced Grapher возможно оперировать обработанной информацией благодаря активной навигационной панели. В нашем случае, резко отличающиеся по уровню сигналы, для более точного выделения рабочих частот, были рассмотрены в масштабе. На рисунке 2.3 видно, что на выделенной частоте рассматриваемая станция работает круглосуточно.

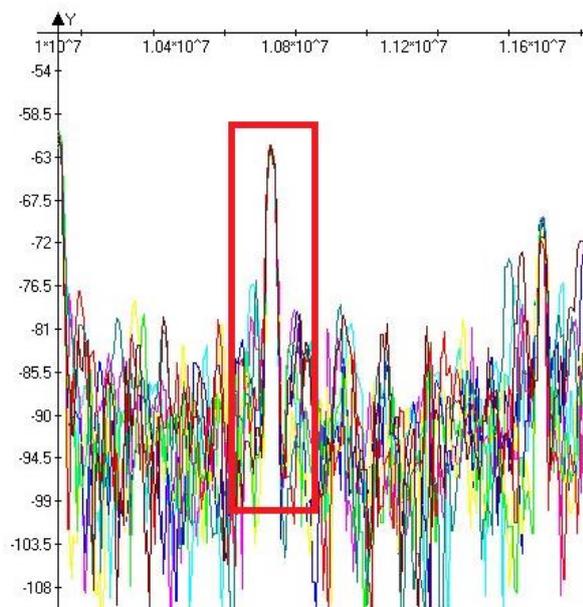


Рисунок 2.3 – Детальное рассмотрение одной из выбранных рабочих частот

Сами данные, снятые со спектроанализатора и использованные в работе, пишутся в текстовых файлах в табличном формате. Каждый текстовый файл соответствует определенному времени. В них представлены данные уровня приема сигнала, относящиеся ко всем частотам заданного на канале диапазона с шагом 30 Гц. Всего за один день анализатор составляет 1440 текстовых файлов, регистрируя данные с интервалом в 1 минуту. На рисунке 2.4 приведен фрагмент такого файла. В первой строчке пишутся начальная и конечная частоты диапазона. Со второй строчки начинаются данные.

Файл	Правка	Формат	Вид	Справка
10000000				-62,0347633361816
10006250,434				-62,0347633361816
10012500,868				-62,1872100830078
10018751,302				-70,9273681640625
10025001,736				-71,8189544677734
10031252,17				-78,1196594238281
10037502,604				-78,1194610595703
10043753,039				-80,7751617431641
10050003,473				-84,4349975585938
10056253,907				-88,119270324707
10062504,341				-102,448143005371
10068754,775				-88,1997222900391
10075005,209				-89,4292144775391
10081255,643				-88,8357696533203
10087506,077				-86,9207763671875
10093756,511				-86,9205856323242
10100006,945				-88,0997161865234
10106257,379				-92,4439163208008
10112507,813				-92,9514923095703
10118758,248				-97,2956085205078
10125008,682				-100,297721862793
10131259,116				-100,297523498535
10137509,55				-102,066307067871
10143759,984				-97,7753829956055
10150010,418				-93,2890090942383
10156260,852				-91,632568359375
10162511,286				-91,6323776245117

Рисунок 2.4 – Фрагмент данных БАРС

На рисунке 2.5 показано главное окно программы BARS Analyser. Программный пакет позволяет обрабатывать данные сразу за несколько дней, строить характеристики с заданным временным интервалом и количеством точек. Также в нем можно вывести графики усредненного уровня за выбранный интервал.

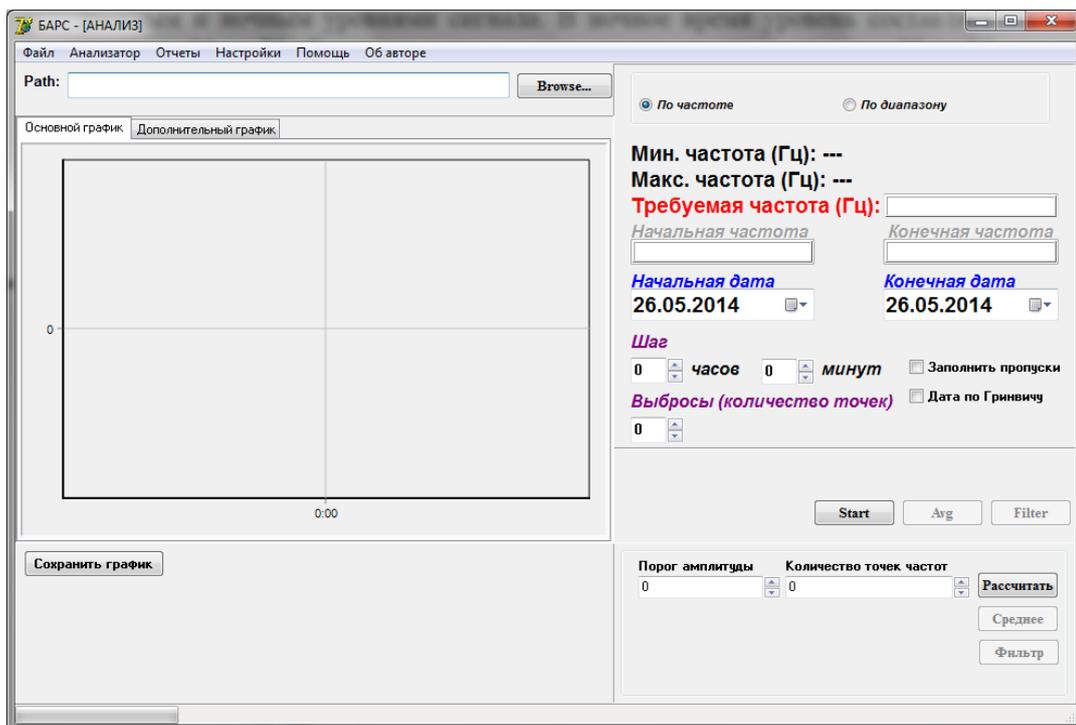


Рисунок 2.5 – Рабочая область программы BARS Analysis

Для решения поставленной в теме диссертации задачи в первую очередь необходимо выделить временные интервалы, в которых происходили мощные солнечные вспышки и в окрестностях Земли регистрировались изменения интенсивности корпускулярной радиации. Одним из таких интервалов оказался период с 22 по 27 июня 2015 года. Данные об интенсивности корпускулярной радиации, зафиксированные в городе Алматы, полученные в Тянь-Шаньской Обсерватории, приведены на рисунке 2.6.

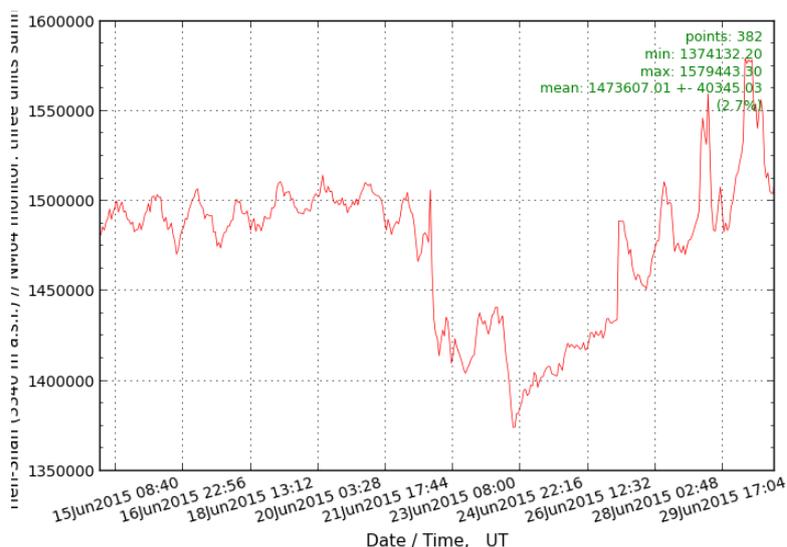


Рисунок 2.6 – График интенсивности нейтронной компоненты галактических космических лучей с 15 по 30 июня 2015 г.

В период с 22 июня и на протяжении нескольких дней наблюдается понижение интенсивности галактических космических лучей (далее – ГКЛ),

что отражено на Рисунке 2.6 (изменение значения количества частиц ГКЛ с $1,482 \cdot 10^6$ до $1,42 \cdot 10^6$). Эффект объясняется повышенным экранированием галактических космических лучей возмущениями межпланетного магнитного поля, переносимыми солнечным ветром в результате солнечной вспышки. Такое явление называется Форбуш-эффектом.

После анализа спектрограммы мы выделили несколько подходящих для исследования частот КВ-диапазона:

- 10,006250 МГц;
- 10,714000 МГц;
- 19,994444 МГц;
- 29,995138 МГц.

С помощью вышеупомянутого программного приложения BARS Analyser строим графики вариаций выделенных нами радиосигналов для промежутка времени с 21 по 27 июня. Указанный промежуток на сутки дольше вышеобозначенного периода, чтобы наглядно продемонстрировать амплитуду сигнала в незатронутый возмущениями день.

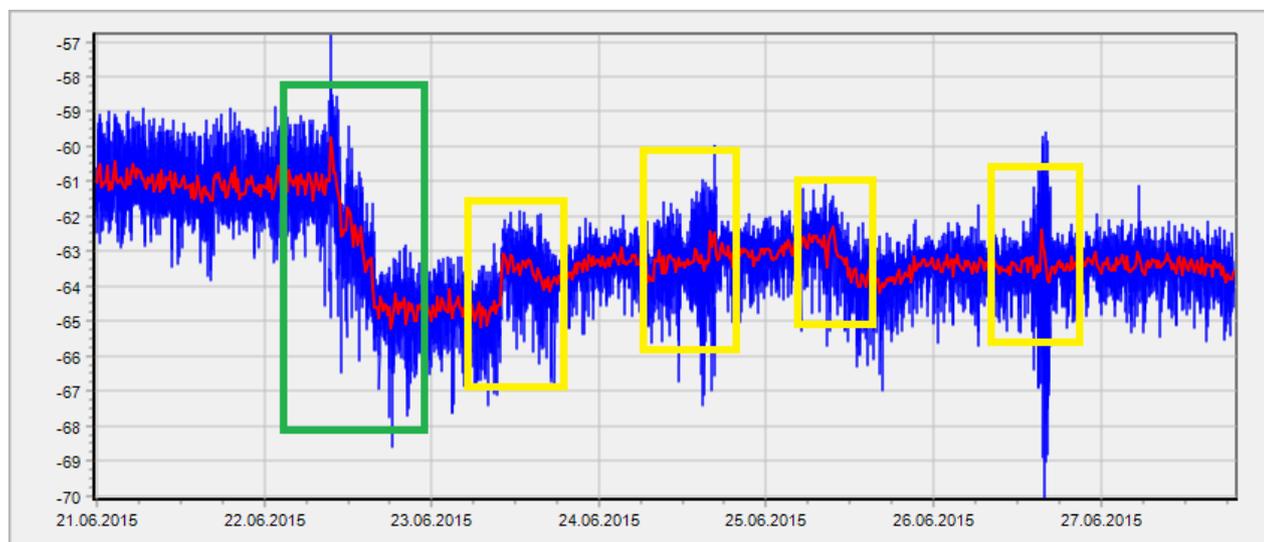


Рисунок 2.7 – Вариация КВ-радиосигнала на частоте 10,006250 МГц.

На рисунке 2.7 рассматривается частота 10,006250 МГц. Синим цветом обозначены исходные значения мощности радиосигнала, который измеряется один раз в минуту. Для более качественного анализа делаем шаг измерений шире - красной линией выделено скользящее среднее с окном в 15 минут. Можно наблюдать, что дневное время суток, в период с 22 на 23 июня, произошло резкое повышение воздействия на амплитуду принимаемого сигнала, снизив силу сигнала на 5-6дБм (выделено зелёным цветом). Далее, наблюдаются скачки с повышением силы сигнала в дневное время суток. В этот период наблюдался Форбуш-эффект галактических космических лучей. К периоду воздействия именно корпускулярной радиации отнесём 23-27 июня. Эффект воздействия и реакции радиосигнала заключался в увеличении в дневное время суток амплитуды принимаемых сигналов (выделено жёлтым

цветом). Амплитуда возрастания мощности сигнала составила около 3 дБм относительно общего понижения.

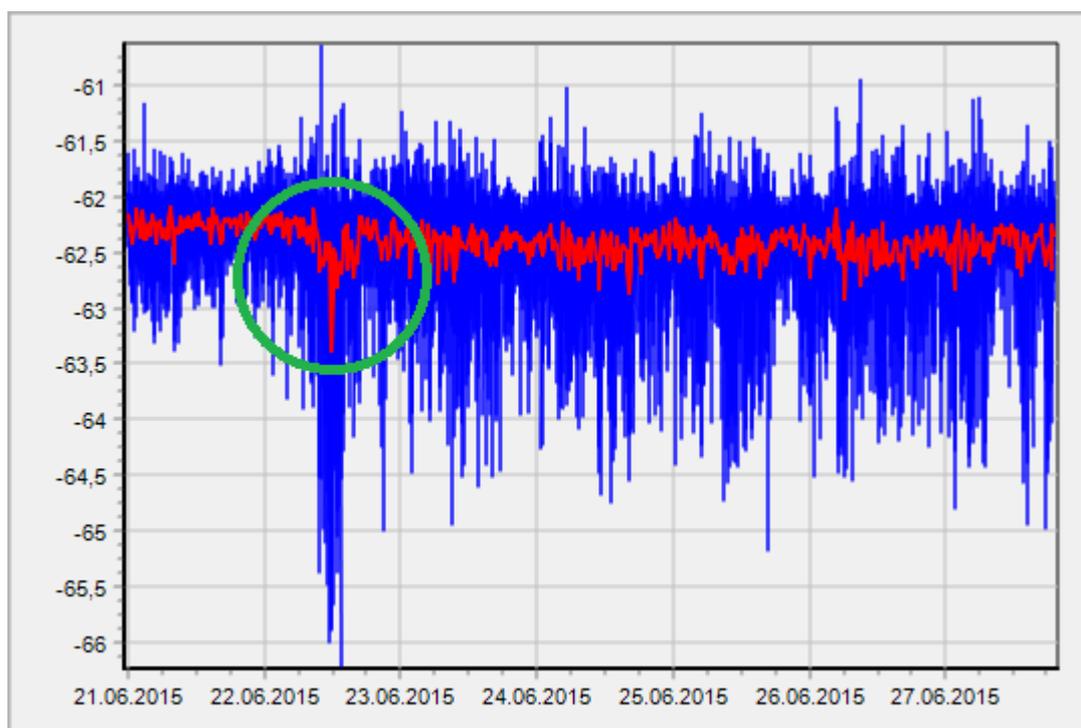


Рисунок 2.8 – Вариация КВ-радиосигнала на частоте 10,714000 МГц.

На рисунке 2.8 наблюдаем вариацию КВ-радиосигнала на следующей выделенной частоте, аналогично помечаем усредненную силу радиосигнала. Здесь четко прослеживается скачок к понижению силы сигнала примерно на 1 дБм, что происходит в то же самое время, что и для предыдущей частоты, хорошо демонстрируя возмущения в межпланетном магнитном слое. На рисунке он выделен зелёным цветом.

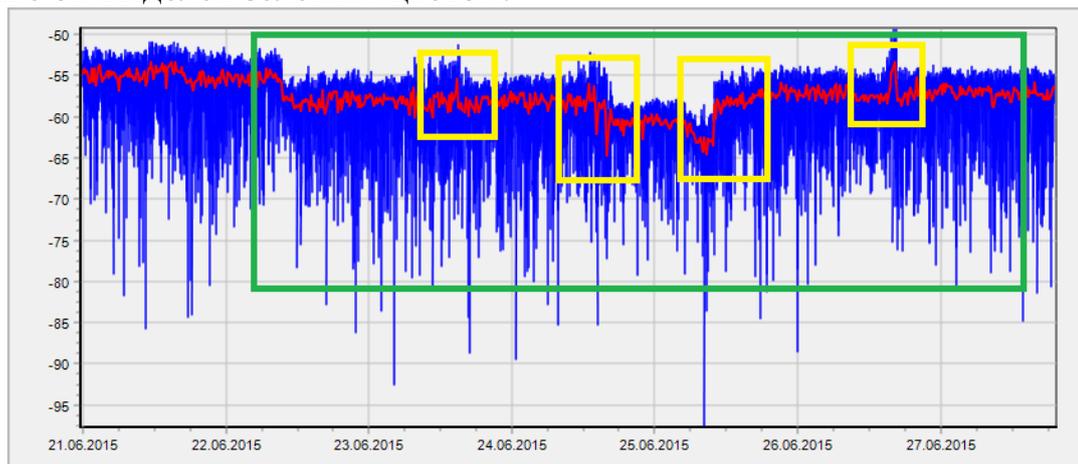


Рисунок 2.9 – Вариация КВ-радиосигнала на частоте 19,994444 МГц.

Очередная рассматриваемая частота (19,994444 МГц) представлена на рисунке 2.9. Здесь также легко прослеживаются скачки повышения силы радиосигнала (около 3-4 дБм) на фоне общего понижения.

Важно заметить, что характер влияния возмущений довольно сложен: в ночь с 25 на 26 июня происходит ещё более глубокое ослабление сигнала, выправляемого позже, днём, действием Форбуш-эффекта.

И, наконец, последняя выделенная частота – 29,995138 МГц, граничащая с диапазоном ультракоротких волн, рисунок 2.10.

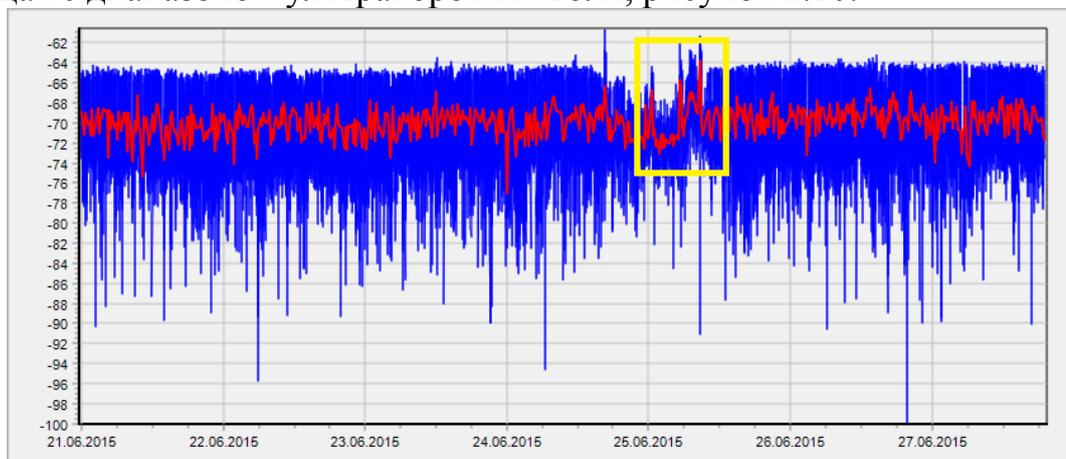


Рисунок 2.10 – Вариация КВ-радиосигнала на частоте 29,995138 МГц.

Здесь, в дневной период с 25 по 26 июня отлично прослеживается эффект экранирования галактических космических лучей возмущенной межпланетной магнитосферой, кратковременно увеличивая слышимость сигнала почти на 8 дБм.

3 Расчетная часть

Ионосфера характеризуется наличием большого количества свободных электронов и ионов. В результате ионизации в атмосфере появляются свободные электроны и положительные ионы. Главным источником ионизации газов в атмосфере служит солнечная радиация. На высоте, превышающей 80 км, ультрафиолетовое излучение Солнца вносит основной вклад в ионизацию. Ниже уровня в 80 км основное влияние оказывается за счёт рентгеновского излучения. Также имеет место ударная ионизация, происходящая за счет потока заряженных частиц, выбрасываемых Солнцем, иначе говоря - солнечным ветром. Влияние последнего на ионизацию атмосферы особенно велико в приполярных районах. Рекомбинация происходит одновременно с ионизацией. При встрече положительного иона с электроном создаётся электрически нейтральная молекула. Тем интенсивнее происходит рекомбинация, чем больше плотность газа.

Полагая, что по химическому составу атмосфера однородна, плотность газа должна монотонно уменьшаться с ростом высоты, а распределение электронной плотности N_e по высоте h должно иметь один общий максимум. Это вызвано тем, что при приближении к поверхности Земли интенсивность ионизирующего излучения снижается, но плотность нейтральных молекул газа возрастает. Однако, экспериментальные исследования ионосферы доказывают ее более сложное строение (рисунок 3.1.)

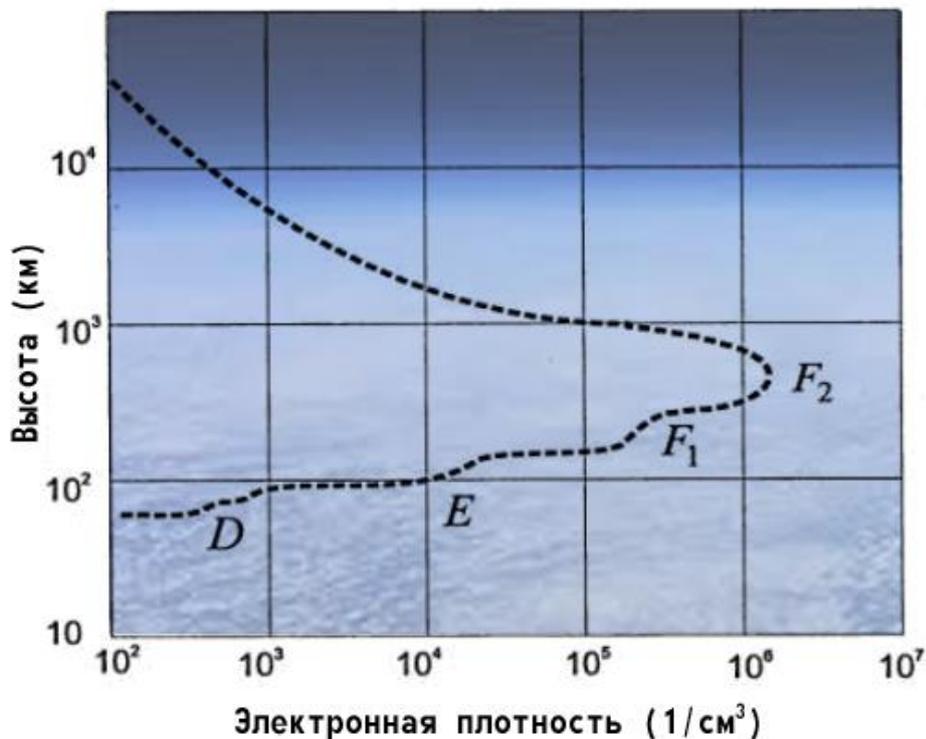


Рисунок 3.1 – Распределение плотности электронов в ионосфере

Свободные электроны отслеживаются в количестве, достаточном для влияния на распространение радиоволн, так как начиная с высот порядка 50 км и выше, электронная плотность растёт до высот в 200–400 км, где и располагается ее главный максимум. Однако, выше него электронная плотность падает. Ниже главного максимума ионосферу называют внутренней, а выше него – внешней ионосферой. Распределение электронной плотности во внутренней ионосфере обозначивается несколькими названными слоями D, E, F, являющимися относительными максимумами. Состояние этих слоев подвержено изменениям суточного и сезонного типа. Распределение электронной плотности $N_e(h)$ является случайной функцией, и можно говорить только о ее среднем регулярном состоянии. Слой D существует исключительно днем под непосредственным влиянием солнечной радиации, а ночью он исчезает. Слой F летним днем условно распадается на два слоя F1 и F2.

Для аналитического описания ионосферы применяется параболическая модель слоя, рисунок 3.2. То есть, зависимость плотности электронов от высоты аппроксимируется до параболы. Тогда следующим выражением задаётся распределение плотности $N_e(h)$ в слое:

$$N_e(h) = n_{em} \left(\left(2z / Z_m \right) - \left(Z^2 / Z_m^2 \right) \right), \quad (3.1)$$

где $Z = h - h_0$, $Z_m = h_m - h_0$, N_{em} - максимальная электронная плотность, h – высота (м);

h_0 - высота нижней границы слоя (м);

h_m - высота максимума слоя (м).

Выражение (3.1), задающее $N_e(h)$ в пределах $h_0 < h < h_0 + 2Z_m$, Z_m , называют полутолщиной слоя. Снаружи этого интервала $N_e(h) = 0$.

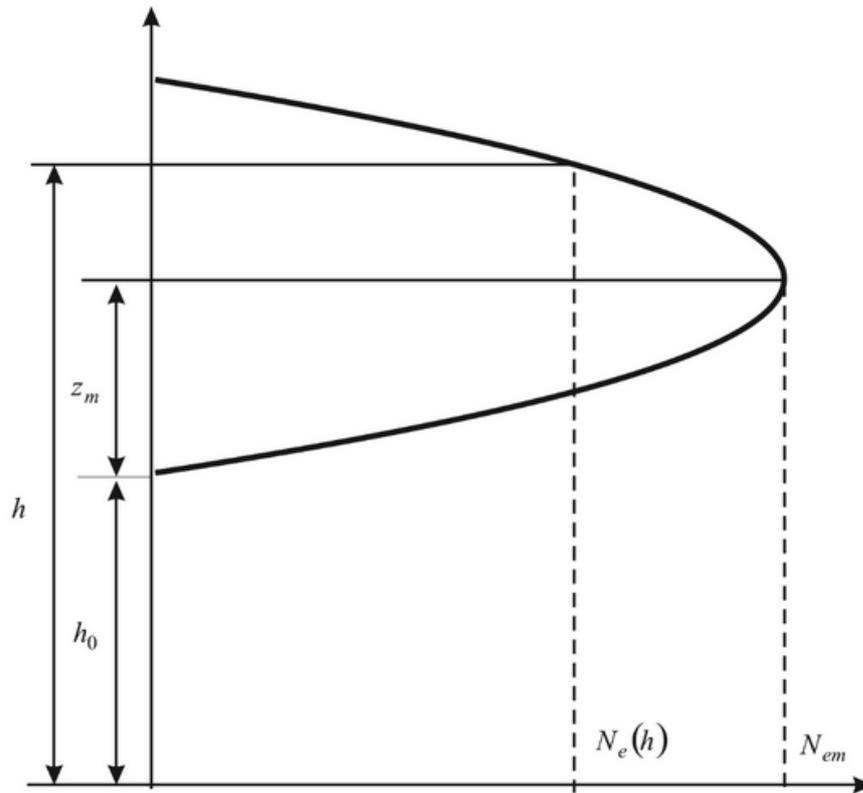


Рисунок 3.2 – Параболическая модель ионосферного слоя

Электромагнитные свойства среды определяются относительной диэлектрической проницаемостью ϵ , относительной магнитной проницаемостью μ и удельной проводимостью σ . Величина μ ионосферы практически не отличается от единицы. Полный ток с плотностью, равной сумме плотностей токов смещения и конвекционного возникает под действием электрического поля частотой ω с напряженностью E в ионосфере:

$$\delta = \delta_{cm} + \delta_k = j \omega \epsilon_0 E + \delta_k \quad (3.2)$$

В то же время, в среде с потерями плотность полного тока согласно первому уравнению Максвелла выражается:

$$\delta = j \omega (\epsilon_0 \epsilon - J_\delta / \omega) E \quad (3.3)$$

Плотность конвекционного тока, обусловленного движением свободных электронов, равна:

$$\delta = e N_e V_e , \quad (3.4)$$

где V_e – средняя скорость упорядоченного движения электронов;
 e – заряд электрона.

Предположим, что состав ионосферы представляет собой электроны с отрицательным зарядом e и положительные ионы с идентичным, но положительным зарядом. Тогда сила поля, действующая на заряженные частицы будет представлять собой:

$$F_s = e E \quad (3.5)$$

Упорядоченная скорость частицы будет обратно пропорциональна ее массе. Из этого следует, что влиянием положительных ионов можно пренебречь, потому что масса их в сотни тысяч раз больше массы электрона m_e .

Электрическая сила уравнивается силой инерции частицы $m_e \cdot d\vec{V}_e/dt$ и силой трения $m_e \vec{V}_e v_{эфф}$, создаваемой вследствие столкновений с другими частицами, где эффективное число соударений в секунду обозначается $v_{эфф}$.

Дифференциальное уравнение движения электрона имеет следующий вид:

$$E = m_e (dV_e / dt) + m_e V_e v_{эфф} \quad (3.6)$$

А его решение для гармонического поля частотой $\omega = 2\pi f$:

$$V_e = (e / m_e) \cdot (v_{эфф} / v_{эфф}^2 + \omega^2) \cdot E - J ((e / m_e) \cdot (\omega / v_{эфф}^2 + \omega^2) \cdot E) \quad (3.7)$$

Для высоких частот, при $\omega^2 \gg v_{эфф}^2$ и после подстановки постоянных значений e , m_e и ϵ_0 получается:

$$\epsilon = 1 - 80.8 \cdot (N_e / f^2)$$

$$\sigma = 7.17 \cdot 10^{-10} \cdot (N_e \cdot v_{эфф} / f^2)$$

Выражения хорошо иллюстрируют, что диэлектрическая проницаемость ионосферы меньше диэлектрической проницаемости вакуума. Причина же здесь заключается в конвекционном токе, при котором электроны движутся в обратном полю направлении. Из плотности тока смещения вычитается плотность конвекционного тока вычитается; устанавливается зависимость диэлектрической проницаемости ионосферы от электронной концентрации.

Ионосфера есть электрически неоднородная среда; её диэлектрическая проницаемость зависит от частоты. Это свидетельствует о наличии дисперсии; диэлектрическая проницаемость ионосферы принимает нулевые значения, если частота поля идентична собственной частоте ионосферной плазмы; по высоте меняется удельная проводимость ионосферы.

Электронная плотность уменьшается в слое D и максимальна в слое F. Число соударений в секунду значительно больше в слое D - проводимость в слое D выше. Однако, этот слой существует только днем, соответственно потери в ионосфере днем значительно больше, чем ночью; - удельная проводимость ионосферы с ростом частоты уменьшается.

Диэлектрическая проницаемость ионосферы плавно меняется по высоте, изначально уменьшаясь проходя через слои D, E и F, а затем увеличиваясь выше них. Распространение радиоволн в ионосфере также сопровождается искривлением их траектории. Положительная рефракция во внутренней ионосфере искривляет траекторию волны, и при соответствующих условиях она может вернуться к земле. Такой принцип и используется в передаче КВ-диапазоне на дальние расстояния.

Получается выражение для электронной плотности для отражения:

$$N_e(h_{omp}) = \frac{f^2 \cos^2 \varphi_0}{80.8}$$

Максимальная частота волны, отражающейся при вертикальном падении на ионосферный слой:

$$f_{кр} = \sqrt{80.8 N_{em}}$$

При превышении критической частоты есть шанс, что отраженная волна не вернется к поверхности Земли, в результате чего образуется «мертвая зона». На рисунке 3.3 показана «мертвая зона».

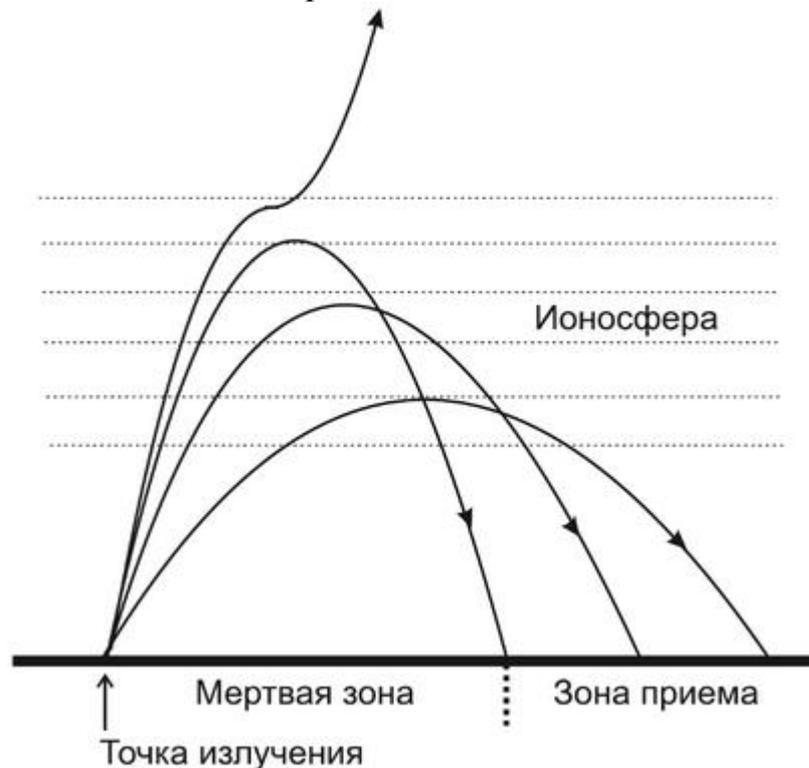


Рисунок 3.3 – Образование мертвой зоны

При анализе воздействия возмущений космической погоды на распространение радиоволн придерживаемся модели, которая включает многолучевость и, следовательно, интерференцию, поглощение мощности средой, а также изменение длины пути распространения. Изменение мощности принимаемого радиосигнала, в общем рассмотрении, происходит по двум параметрам L_0 и ΔL .

$$P_{эсп} = \frac{P_{изл}}{L_0 \cdot \Delta L}, \quad (3.8)$$

где L_0 – поглощение в свободном пространстве;

ΔL – дополнительное поглощение за счёт изменения характеристик среды распространения.

Общее поглощение энергии радиоволны должно складываться из изменений обеих составляющих L_0 и ΔL .

Фактор L_0 , являющийся коэффициентом затухания мощности радиоволны, вычисляется исходя из условия, что распространение радиоволн происходит в свободном пространстве, то есть между передающей и приёмной антеннами не имеется ни атмосферы, ни каких-то физических препятствий. Это вычисление осуществляется очень легко, когда известны основные свойства приёмной и передающей антенн.

Так как при изменении высотного профиля электронной концентрации основные свойства приёмно-передающего тракта не меняются, можно записать

$$L_0 \approx \frac{(4\pi d)^2}{\lambda^2}. \quad (3.9)$$

То есть, изменения L_0 и, следовательно, мощности принимаемого радиосигнала для выбранной частоты, будут пропорциональны изменению квадрата длины пути - d^2 .

Вариации характеристик сигнала в ионосфере определяются комплексной диэлектрической проницаемостью ϵ' , связанной с показателем преломления n и поглощения α следующим выражением:

$$\begin{aligned} \epsilon' &= (n-i\alpha)^2 = (n^2 - \alpha^2) - i2n\alpha \\ \epsilon' &= -99,719 \end{aligned} \quad (3.10)$$

из которого по данным диэлектрической проницаемости ϵ и проводимости σ плазмы рассчитываются величины показателя преломления n и поглощения α радиоволны в ионосферной плазме:

$$n_i = \sqrt{\frac{\epsilon}{2} + \sqrt{\left(\frac{\epsilon}{2}\right)^2 + \left(\frac{2\pi\sigma}{\omega}\right)^2}}, \quad (3.11)$$

$$N_i = 2,905$$

$$\alpha = \sqrt{-\frac{\epsilon}{2} + \sqrt{\left(\frac{\epsilon}{2}\right)^2 + \left(\frac{2\pi\sigma}{\omega}\right)^2}}. \quad (3.12)$$

$$\alpha = 7,893$$

Для расчётов траектории распространения радиосигнала в диспергирующей среде через закон Снеллиуса:

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_{i+1}} = \frac{n_{i+1}}{n_i}$$

Значение будет равным 1,344 единицам.

Параметрами ионосферы, необходимыми для расчета значений напряженности поля, являются следующие профили, зависящие от высоты ионосферы, Z . Это профиль концентрации электронов, профили концентраций положительных и отрицательных ионов, профиль частоты столкновений

электронов с нейтральными частицами и профили частоты столкновений положительных и отрицательных ионов с нейтральными частицами.

Удобным параметром, основанным на вышеназванных профилях, является проводимость ионосферы, ω_r , которая зависит от высоты Z . Этот параметр описывается выражением:

$$\omega_r(Z) = \frac{\omega_p^2(Z)}{\nu(Z)} = \frac{q^2}{\epsilon_0} \left[\frac{N_e(Z)}{m_e \nu_e(Z)} + \frac{N_+(Z)}{m_+ \nu_+(Z)} + \frac{N_-(Z)}{m_- \nu_-(Z)} \right], \quad (3.13)$$

где:

$\omega_p(Z)$ - плазменная частота;

q - заряд электрона;

ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость свободного пространства;

ν_e - частота столкновений электронов с нейтральными частицами (с^{-1});

ν_+ - частота столкновений положительных ионов с нейтральными частицами (с^{-1});

ν_- - частота столкновений отрицательных ионов с нейтральными частицами (с^{-1});

N_e - концентрация электронов (см^{-3});

N_+ - концентрация положительных ионов (см^{-3});

N_- - концентрация отрицательных ионов (см^{-3});

m_e - масса электрона;

m_+ - масса положительных ионов;

m_- - масса отрицательных ионов.

Заключение

В наши дни особенно актуальной является необходимость рассмотрения эффектов космической погоды, так как каждый из нас сильно зависит от возможности в любой момент быть на связи, и долгосрочное прогнозирование изменений среды становится необходимым элементом планирования связи. С развитием телекоммуникационных систем актуальность этой проблемы будет только расти.

В магистерской диссертации представлены современные знания о воздействии космической погоды на среду распространения и характеристики радиоволн. Дается определение космической погоды, как возмущений электромагнитной и корпускулярной радиации, создаваемых солнечными вспышками и воздействующих на среду распространения радиоволн. Даны характеристики околоземных и атмосферных сред и их влияния на распространение радиоволн исследуемого КВ-диапазона. Описана траектория распространения радиоволн в ионосфере.

В ходе работы был проведен эксперимент с помощью многоканального анализатора "БАРС", в ходе которого были детально разобраны различные

По теме диссертации написана научная статья, опубликованная в научном журнале университета АУЭС — «Вестник АУЭС».

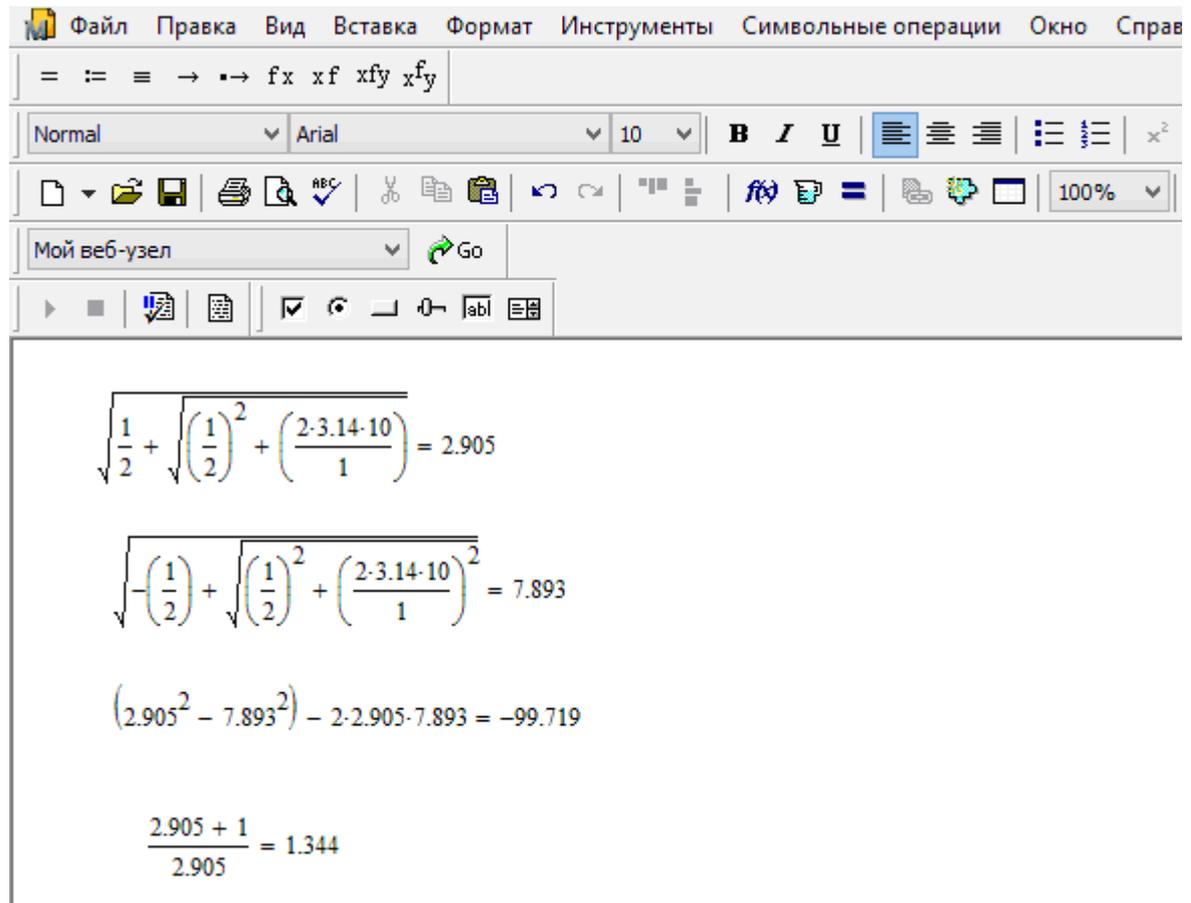
На основе поставленного эксперимента сформулирован вывод, что ночные уровни КВ-сигналов в периоды возмущений магнитного поля Земли всегда в пункте приёма уменьшают свою мощность. Однако, в данном случае имел место и Форбуш-эффект, кратковременно повышающий силу сигнала.

Список литературы

1. Козин И.Д., Федулина И.Н. Солнечные вспышки и распространение радиоволн // Известия НАН РК. – 2015. - Т. 4. - № 302. – С. 40-45.
2. В.Л. Гинзбург. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: «Наука», 1967, 683 с.
3. И.Д. Козин, И.Н. Федулина. Космическая погода и ее влияние на распространение радиоволн: Учебное пособие/; АУЭС. Алматы, 2012, - 79 с.
4. И.Д. Козин, И.Н. Федулина. Распространение радиоволн: Учебное пособие/ АУЭС. Алматы, 2013, - 78 с.
5. Козин И.Д., Федулина И.Н. Трансионосферное распространение радиоволн // Известия НАН РК. – 2015. - Т. 4. - № 302. – С. 49-53.
6. Козин И.Д., Федулина И.Н., Васильев И.В., Проценко В.А., Кирпун В.В. Прибор контроля занятости радиоэфира // Известия НАН РК. – 2015. - Т. 4. - № 302. – С. 46-49.
7. Козин И.Д., Федулина И.Н. Механизмы взаимодействия радиационных поясов с верхней ионосферой // Доклады МОН РК. – 2001. - №

Приложение А

Окно программы MathCAD



Файл Правка Вид Вставка Формат Инструменты Символьные операции Окно Справка

Normal Arial 10 **B** *I* U | [List Bulleted] [List Numbered] [List None] | x²

Мой веб-узел Go

$$\sqrt{\frac{1}{2} + \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot 3.14 \cdot 10}{1}\right)^2}} = 2.905$$
$$\sqrt{-\left(\frac{1}{2}\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot 3.14 \cdot 10}{1}\right)^2}} = 7.893$$
$$(2.905^2 - 7.893^2) - 2 \cdot 2.905 \cdot 7.893 = -99.719$$
$$\frac{2.905 + 1}{2.905} = 1.344$$

Рисунок А – Окно программы MathCAD (вычисление показателя преломления)