

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 СВ-диапазона»

Магистрант: Ержигитов Н. Б. Ержигитов Н. Б. группа МТСП 14-1
(Ф.И.О.) (подпись)
Руководитель: доцент И.И.И. Федулина И.Н.
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)
Рецензент _____ к.т.н. Касимов А. О.
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)
Консультант по ВТ: старший преподаватель Демидова Г.Д.
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)
Нормоконтроль: старший преподаватель Кондратович А.П.
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Алматы 2016

**Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»**

Факультет: «Радиотехники и связи»

Специальность: 6М071900 «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

Кафедра: «Телекоммуникационные системы»

ЗАДАНИЕ

на выполнении магистерской диссертации

Магистранту Ержигитову Н.Б.

(фамилия, имя, отчество)

Тема диссертации «Исследование воздействия возмущенной корпускулярной радиации на характеристики СВ-диапазона»

утверждена Ученым советом университета №141 от «__» _____

Срок сдачи законченной диссертации «__» _____

Цель исследования

Исследовать процесс воздействия возмущенной корпускулярной радиации на характеристики средневолнового диапазона

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов или краткое содержание магистерской диссертации:

1. Описание явления корпускулярной радиации, описание СВ-диапазона

2. Проведение эксперимента. Поиск радиостанций

3. Анализ вариации сигнала в программе БАРС

4. Проведение расчёта параметров

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

Интенсивность солнечных вспышек и корпускулярной радиации

Спектрограмма

Вариация радиосигнала на частоте 352 кГц

Вариация радиосигнала на частоте 176 кГц

Рекомендуемая основная литература

1. В.Л. Гинзбург. Распространение электромагнитных волн в плазме. «Наука», 1967

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

Г Р А Ф И К
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
1. Описание явления корпускулярной радиации. Описание свойств СВ-диапазона	30.09.2014	
2. Проведение эксперимента. Поиск радиостанций	15.10.2014	
3. Проведение анализа вариации сигнала в программе БАРС	7.02.2015	
4. Проведение расчётов параметров	6.10.2015	

Дата выдачи задания _____

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

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

Задание принял к исполнению магистрант Ержигитов Н.Б. (подпись) (Ержигитов Н.Б.) (Ф.И.О.)

Аннотация

В данной диссертации проводится исследование влияния корпускулярной радиации на распространение радиоволн в ионосфере. Проведён эксперимент о степени влияния корпускулярной радиации на средневолновой диапазон.

Abstract

In this thesis research is conducted on the effect of corpuscular radiation propagation in the ionosphere. Conducted an experiment on the degree of influence of the corpuscular radiation in the medium wave band.

Аңдатпа

Бұл диссертацияда, радиотолқындардың таратууна корпускулярлық радиацияның әсер ету зерттеледі. Орта толқындық диапазонға, корпускулярлық радиацияның әсерету туралы зерттеу жүргізілді.

Содержание

Введение	6
1 Общие положения	7
1.1 Корпускулярная радиация	7
1.2 Радиоволны	8
1.3 Распространение радиоволн в ионосфере	11
1.4 Распространение радиоволн в свободном пространстве	20
1.5 Ионосферные возмущения	21
1.6 Возмущения корпускулярной радиации	24
1.7 Средневолновые затухания	27
2 Экспериментальная часть	30
2.1 Проведение эксперимента	31
2.2 Результаты эксперимента	34
3 Расчётная часть	35
Заключение	41
Список литературы	42
Приложение А Окно программы Mathcad	43
Приложение Б Окно программы БАРС	44
Приложение В Окно программы Барс	45

Введение

Природа постоянно оказывает воздействие на деятельность человека. Помимо положительных факторов, природа оказывает и пагубное влияние. Солнце является для Земли источником света и тепла. Современные технологии разработали солнечные батареи, которые накапливают солнечный свет, и преобразуют его в энергию. Однако есть и не совсем положительные факторы. Солнечные эффекты оказывают отрицательное влияние на радиосвязь. Корпускулярная составляющая – поток плазмы, состоящий из протонов и электронов (так называемый солнечный ветер) и достигающий через сутки околоземного пространства, почти полностью обтекает магнитосферу Земли. Корпускулярные потоки – это газовые частицы, которые при солнечных вспышках выбрасываются в космическое пространство и достигают поверхности Земли. Магнитные поля корпускулярных потоков, попадая в зону влияния Земли, взаимодействуют с силовыми линиями магнитного поля, вызывая полярные сияния, геомагнитные бури и нарушения радиосвязи.

1 Общие положения

1.1 Корпускулярная радиация

Корпускулярная радиация — поток плазмы, состоящий из протонов и электронов. Следует отметить, что данный термин является калькой с англ. *Solarradiation* («Солнечное излучение»), и в данном случае не означает радиацию в «бытовом» смысле этого слова (ионизирующее излучение). Существует также корпускулярная часть солнечной радиации, состоящая преимущественно из протонов. Они движутся от Солнца со скоростями 300—1500 км/с. В период действия солнечных вспышек появляются частицы больших энергий (в основном протоны и электроны), которые образуют солнечную компоненту космических лучей. Энергетический вклад корпускулярной составляющей солнечной радиации в её общую интенсивность невелик по сравнению с электромагнитной. Поэтому в ряде приложений термин «солнечная радиация» используется в узком смысле, имея в виду только её электромагнитную часть. Основным источником, от которого поверхность Земли и атмосфера принимают тепловую энергию, является Солнце. Оно отправляет в мировое пространство колоссальное количество лучистой энергии: тепловой, световой, ультрафиолетовой. Излучаемые Солнцем электромагнитные волны распространяются со скоростью 300 000 км/с. От величины угла падения солнечных лучей зависит нагревание земной поверхности. Все солнечные лучи прибывают на земную поверхность параллельно друг другу, но так как Земля имеет сферическую форму, солнечные лучи падают на разные участки ее поверхности под разными углами.

Корпускулярная радиация дополняет частицами радиационные пояса Земли и хвост магнитосферы Земли, вытянутый в сторону, противоположную от Солнца. Усиление корпускулярной радиации вызывает увеличение плотности ионосферных слоев, что приводит на освещенной стороне Земли к ослаблению или прекращению радиосвязи на коротких волнах и к улучшению радиосвязи на длинных. При этом образуется аномальная ионизация, которая является причиной сильных нарушений радиосвязи, полярным сияниям и усилению свечения ночного неба (в результате возбуждения корпускулами атомов воздуха), образуются магнитные бури как результат движений потоков заряженных частиц. В свою очередь, результатом колебаний магнитного поля становятся земные токи и индукционные токи в проводниках различных устройств, образующие помехи в процессе их работы.

Различаются три вида корпускулярной радиации:

1) солнечные корпускулярные потоки из особенно активных участков солнечной атмосферы, состоящие главным образом из ядер гелия и электронов и образующие в земной атмосфере магнитные бури и полярные сияния;

2) солнечное космическое излучение во время сильных вспышек, содержащее, кроме ядер гелия, еще протоны и ядра тяжелых элементов, а также электроны и нейтроны;

3) солнечный ветер — смесь потоков, нейтронов, альфа-частиц (ядер гелия) и электронов.

1.2 Радиоволны

Радиоволны (радиочастоты), используемые в радиотехнике, составляют спектр от 10 км (3 кГц) до 0.1 мм (3 000 ГГц). Эти волны занимают часть общего спектра волн. Инфракрасные или тепловые лучи — волны меньшей длины. За ними следуют волны видимого света, затем — ультрафиолетовые, рентгеновские и гамма лучи. Все эти волны одной природы. Они отличаются только длиной волны. Границы между этими типами условны. Области следуют одна за другой, плавно переходят одна в другую, а иногда перекрываются. Частоты 455, 465 и 500 кГц являются специальными — они используются в качестве промежуточных в большинстве супергетеродинных приёмников длинных, средних и коротких волн. К средним волнам относятся радиоволны длиной от 100 до 1000 м (частоты 3-0,3 МГц). Средние волны используются главным образом для вещания. Они могут распространяться как земные так и ионосферные волны. Средние волны испытывают значительное поглощение в полупроводящей поверхности Земли. На большие расстояния радиоволны распространяются ионосферной волной. В ночное время средние волны распространяются путём отражения от слоя ионосферы, электронная плотность которого оказывается достаточной для этого. В дневные часы на пути распространения волны расположен слой, чрезвычайно сильно поглощающий средние волны. В диапазоне средних волн более длинные волны испытывают меньшее поглощение, и напряженность электрического поля волны больше на длинных волнах. Поглощение увеличивается в летние месяцы и уменьшается в зимние месяцы. Межспутниковая служба - служба связи между искусственными спутниками Земли. Фиксированная спутниковая служба - служба связи между наземными станциями с заданным местоположением, при использовании одного или нескольких спутников. Заданное местоположение представляет собой любой неподвижный или фиксированный пункт, расположенный в установленных зонах; в отдельных случаях в службу могут включаться линии спутник - спутник, которые используются в том числе в межспутниковой службе; также в данной службе могут содержаться фидерные линии для других служб радиосвязи.

Название волны	Длина волны	Название частот	Диапазон частот
Декамегаметровые	100 Мм — 10 Мм	Крайне низкие (КНЧ)	3—30 Гц
Мегаметровые	10 Мм — 1 Мм	Сверхнизкие (СНЧ)	30—300 Гц
Гектокилометровые	1000 км — 100 км	Инфранизкие (ИНЧ)	300—3000 Гц
Мириаметровые	100 км — 10 км	Очень низкие (ОНЧ)	3—30 кГц
Километровые	10 км — 1 км	Низкие (НЧ)	30—300 кГц
Гектометровые	1000 м — 100 м	Средние (СЧ)	300—3000 кГц
Декаметровые	100 м — 10 м	Высокие (ВЧ)	3—30 МГц
Метровые волны	10 м — 1 м	Очень высокие (ОВЧ)	30 – 300 МГц
Дециметровые	1000 мм — 100 мм	Ультравысокие (УВЧ)	300—3000 МГц
Сантиметровые	100 мм – 10 мм	Сверхвысокие (СВЧ)	3—30 ГГц
Миллиметровые	10 мм — 1 мм	Крайне высокие (КВЧ)	30 – 300 ГГц

Таблица 1.1 – Классификация радиоволн

Спутниковая подвижная служба – ведомство, занимающееся организацией связи между станциями, расположенными на Земле и станциями, дислоцированными в космосе. Также эта служба используется для связи между космическими станциями. Для связи между станциями, расположенными на Земле посредством спутника также используется данное ведомство. Данное ведомство может включать также фидерные линии. Подвижная служба - ведомство для связи подвижными или сухопутными и подвижными службами. Служба космической эксплуатации - организация, с помощью которой осуществляется эксплуатация космических кораблей. Например, для космического мониторинга, телеметрии и телеуправления. Подвижная сухопутная служба - ведомство между подвижными сухопутными станциями и базовыми станциями и между самими подвижными станциями. Спутниковая сухопутная подвижная служба - ведомство, в которой земные станции расположены на суше. Подвижная морская служба – организация, деятельностью которой является связь между станциями, расположенными на берегу, и станциями, дислоцированными на судах, также между станциями на судах, или между станциями связи внутри судов, станциями спасения и радиомаячными станциями. Подвижная спутниковая морская служба - ведомство, в котором на борту морских

кораблей устанавливаются земные станции; станциями средств спасения и радиомаячными станциями.



Рисунок 1.1 – Распространение средних волн

Портовая служба – ведомство, предназначенное исключительно для управления движением судов, обеспечения безопасного положения в порту или вблизи него между станциями, дислоцированными на берегу, и станциями, расположенными на судах, а также между станциями на судах. Это ведомство не используется для организации передачи сообщений общей связи. Служба судового движения – ведомство обеспечения безопасности в подвижной морской службе, отличающаяся от службы в порту, между станциями, расположенными на берегу, и станциями, расположенными на судах, а также между станциями на судах, используемая для передачи сообщений, относящихся исключительно к передвижению кораблей. Эта служба не используется для передачи сообщений общей связи. Подвижная воздушная служба - служба между неподвижными станциями подвижной воздушной службы и станциями, расположенными на воздушных судах или между этими станциями. В данном ведомстве могут участвовать станции на спасательных средствах; радиомаячные станции - обнаруживают места происшедшего бедствия также могут участвовать в этой службе на выделенных частотах. Подвижная воздушная служба - ведомство, отводящееся для связи, для обеспечения безопасного положения и регулярности полетов, в основном на гражданских авиатрассах. Подвижная воздушная служба - ведомство, целью которого является наводка полетов, в основном за пределами гражданских авиатрасс. Спутниковая подвижная воздушная служба – ведомство, в котором подвижные станции установлены на борту судна; станции средств спасения и радиомаячные станции — также могут быть в этом ведомстве. Воздушная подвижная спутниковая служба – ведомство, выделяемое для обеспечения наибольшего безопасного положения и регулярности полетов, в основном на гражданских воздушных авиатрассах. Подвижная воздушная спутниковая служба – ведомство, предназначенное для организации связи, касающейся организации полетов, в основном за пределами гражданских воздушных трасс. В пределах прямой видимости (луч 2) распространяются сигналы всех диапазонов, а СВ-, ДВ- и

СДВ - сигналы из-за эффекта дифракции распространяются за пределы горизонта. Плотность потока и траектория распространения электромагнитной волны описываются вектором Умова-Пойнтинга, в единой системе интернациональной СИ измеряется в Вт/м². На характеристики распространения радиоволн оказывают воздействие нейтральные и плазменные среды. К плазменным средам относятся радиационные пояса и ионосфера, к нейтральным средам - тропосфера, стратосфера и безвоздушное космическое пространство. Радиоволны, которые используются в различных системах связи, могут распространяться в трёх разных областях. Общей компонентой для всех областей является магнитное поле Земли. Первая область - это безвоздушное или свободное пространство, которому наиболее близко соответствует область, расположенная выше ионосферы, то есть выше 1000 км. Эта среда также называется экзосферой. Вторая среда – ионосфера и радиационные пояса. Ионосфера расположена на высотах от 50 до 1000 км и отличается от других сред количеством свободных электронов и ионов, существенно оказывающих влияние на распространение радиоволн. Радиационные пояса дислоцируются в высотных диапазонах 1,5 – 5 тыс. км (внутренний, протонный) и 20 – 30 тыс. км (внешний, электронный). Третья среда дислоцирована чуть ниже ионосферы, отличается значительной плотностью атмосферного газа, наличием тяжёлых примесей и молекул воды, воздействующий на показатель преломления и поглощение энергии радиосигналов. Данными средами являются стратосфера и тропосфера. Солнечная и космическая радиация делятся на электромагнитные и корпускулярные излучения. Корпускулярные излучения представляют собой потоки нейтральных атомов, их ядер и электронов.

1.3 Распространение радиоволн в ионосфере

В атмосфере, охватывающей Земное пространство, различают три области, которые оказывают влияние на распространение волн: стратосферу, тропосферу и ионосферу. Границы между данными областями довольно нечёткие и зависят от времени и местоположения. Ионосфера - это слой атмосферы планеты, сильно ионизированный в результате облучения космическими лучами. У планеты Земля — это верхняя часть атмосферы, включающая в свой состав мезосферу, мезопаузу и термосферу. На этих высотах плотность воздуха весьма мала и воздух ионизирован, т. е. присутствует огромное число свободных электронов. Наличие свободных электронов оказывает существенное влияние на электрические свойства ионосферы и обуславливает возможность отражения от ионосферы радиоволн. При однократном отражении радиоволны могут перекрывать расстояние по поверхности Земли до 4000 км. В результате многократного отражения от ионосферы и поверхности Земли радиоволны могут распространяться на любые расстояния по земной поверхности

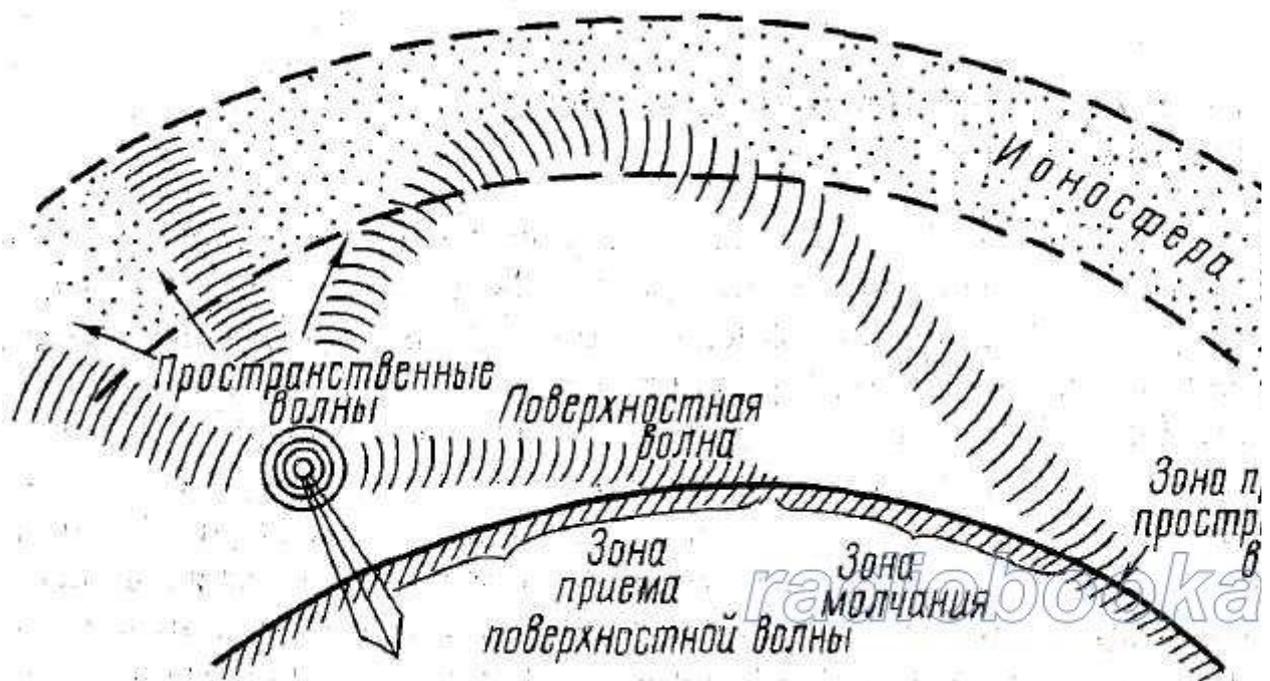


Рисунок 1.2 – Распространение радиоволн

Волны, которые при распространении либо отражаются от ионосферы, либо рассеиваются в ней, называются ионосферными волнами. Наличие в верхних слоях атмосферы свободных электронов определяет электрические параметры ионизированного газа — его диэлектрическую проницаемость и проводимость. Минимальная высота, с которой начинает наблюдаться заметная электронная плотность, равна 60 км. С изменением высоты электронная плотность меняется, а значит, свойства ионосферы неоднородны. До того, как появилась возможность проводить прямые измерения при помощи ракет, для исследования ионосферы использовались ее способности поглощения, отражения и рассеивания сигналов. Самым часто используемым методом было вертикальное зондирование. Суть метода заключалась в том, что измерялось время распространения импульса до отражающего слоя и обратно к приемнику. Для этого использовался набор частот диапазона КВ. С ростом частоты уменьшалась высота точки отражения. По собранным данным зависимости задержки от частоты строилась ионограмма. Время запаздывания t , измеряемое для любой частоты ниже критической, можно перевести в «эквивалентную», или

«действующую» высоту h на основе предположения, что волна распространяется со скоростью света до ионосферы и обратно к Земле. Таким образом, $h' = ct/2$. Фактически радиосигнал замедляется в ионосфере, останавливаясь на уровне отражения. Поэтому действующая высота h' всегда больше истинной высоты отражения hr . Функция действующей высоты от частоты называется ионограммой. Из ионограммы видно, что ионосфера представляет собой слоистую структуру. Вблизи критической частоты наблюдается расщепления сигнала на обыкновенную и необыкновенную компоненты. Частоты выше критических значений не отражаются, и радиоволна проходит сквозь ионосферу. От этой модели легко совершить переход к сферически слоистой модель ионосферы.

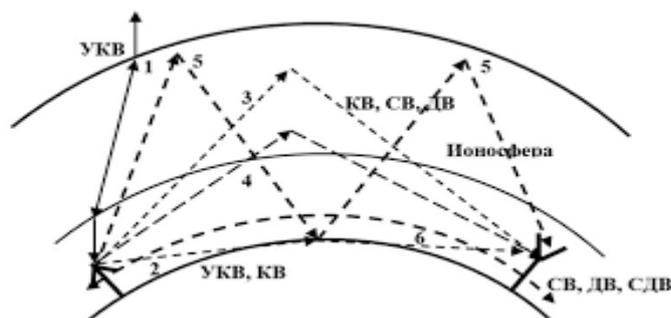


Рисунок 1.3 – Основные траектории распространения радиоволн

К методам, использующим тот же принцип, относятся наклонное и возвратно-наклонное зондирование, радиопросвечивание ионосферы, метод частичных отражений и измерения прохождения радиосигналов на радиотрассах. Отдельного упоминания заслуживают методы некогерентного рассеяния, радиолокационные и риометрические исследования. Эти методы используются не только для исследования самой ионосферы, но также для исследования магнитосферных процессов. В частности измерение поглощения космического радишума с помощью риометров в основном использовалось для исследования пространственно-временных характеристик потоков заряженных частиц магнитосферного и солнечного происхождения, выпадающих в полярную и авроральную ионосферу. Аналитические модели дают хорошую оценку этого параметра при условии спокойной геомагнитной обстановки, но в случае возмущенной ионосферы оценка полного электронного содержания становится существенно менее точной, что негативно сказывается на работе различных (в частности навигационных) спутниковых систем. Радиопросвечивание атмосферы с помощью сигналов спутниковых радионавигационных систем и сети наземных станций является легкодоступным и не требующим больших затрат способом мониторинга ионосферы в реальном времени. Особый интерес вызывают результаты доплеровского зондирования ионосферы в связи с возможным воздействием на нее акустического излучения сейсмодивергаторов. Волны диапазона инфразвука могут распространяться на огромные расстояния и при относительно благоприятных условиях (небольшом затухании и рассеянии, слабой рефракции в атмосфере)

достигать высот, на которых образуются нижние слои ионосферы. Когда акустическая волна проходит через область, в которой происходит отражение радиоволны, данная радиоволна модулируется по фазе. Для усиления эффекта зондирование желательно осуществлять на радиочастотах, отражаемых нижними слоями ионосферы. Когда радиоволна распространяется в неоднородной среде, происходит искривление ее траектории. Если электронная плотность окажется достаточно большой, то радиоволна искривится настолько, что она возвратится на Землю. Таким образом, происходит отражение радиоволны от ионосферы. Радиоволны, посланные с Земли в ионосферу, отражаются не на границе ионизированного газа и воздуха, а в самой толще ионизированного газа.

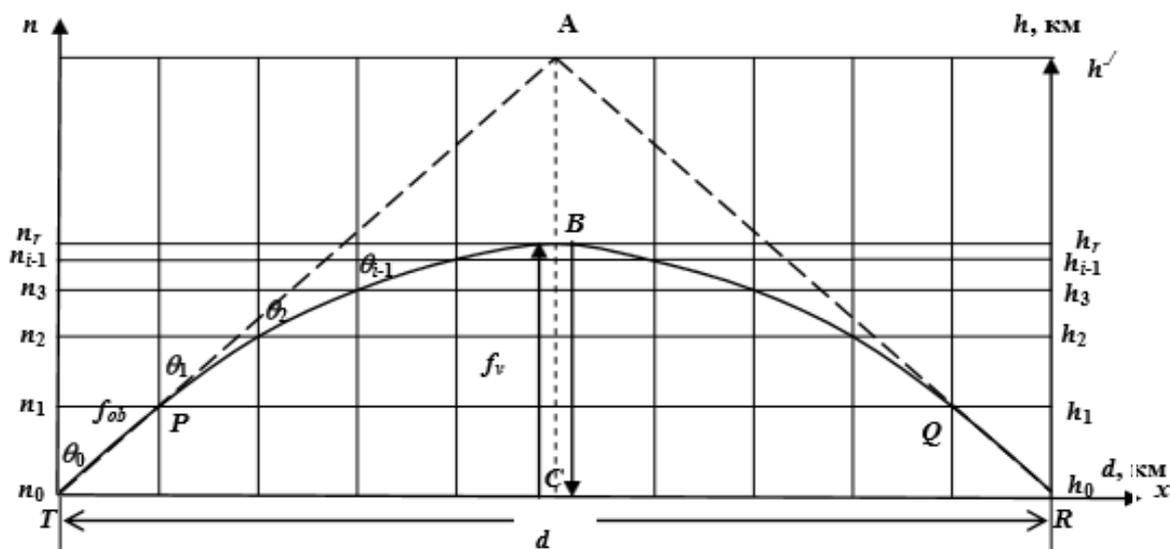


Рисунок 1.4 - Плоскостроистая модель ионосферы

Отражение происходит на высоте, ниже максимума электронной плотности слоя, так как диэлектрическая проницаемость должна убывать с увеличением высоты, а, соответственно, электронная плотность – увеличиваться. Свободные электроны, образовавшиеся при ионизации атмосферного газа, существенно влияют на распространение радиоволн. Ионосфера обладает свойствами проводника, имеющего сопротивление. В ней выполняются все условия распространения радиоволн, описываемые уравнениями Максвелла. Различают четыре области ионосферы. В самой нижней её части (50-90 км) расположена область D. В ней может быть два слоя C и D. Выше области D до 120 км расположена область E, в которой кроме нескольких регулярных слоёв E иногда образуется спорадический слой E, появление которого не вписывается в какие-либо закономерности. Над областью E до высот примерно 1000 км расположена область F ионосферы, в которой достигается максимальная концентрация свободных электронов. В области F также может находиться несколько слоёв, их именуют как F1, F1½ и F2. Выше области F располагается область, именуемая экзосферой.

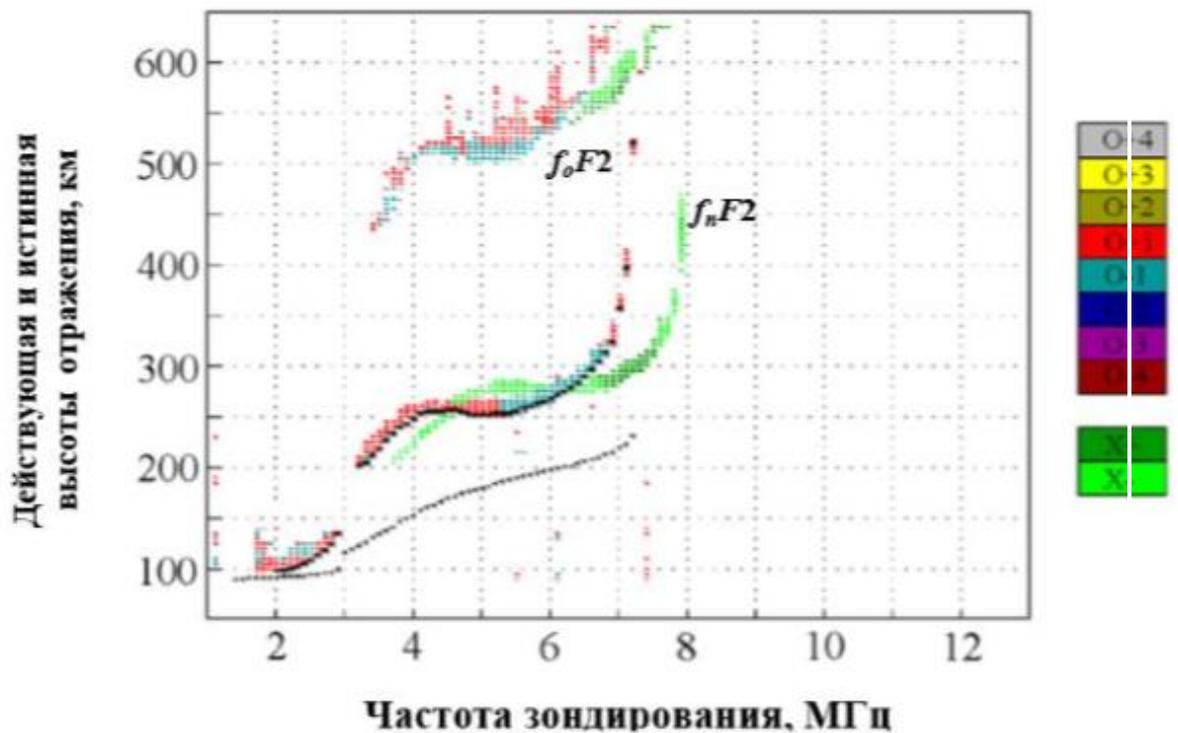


Рисунок 1.5 - Ионограмма для ночного времени суток

Эффективный коэффициент рекомбинации α' зависит от сорта иона M^+ . Существенным различием коэффициента рекомбинации α обладают атомарные, молекулярные и кластерные (типа $M^+ \cdot (H_2O)$) ионы. Основные характеристики нейтральных компонент N_2 , O_2 и O , вызывающие электронообразование, следующие: потенциалы ионизации мало отличаются друг от друга и равны 15,51 для молекулярных и 13,61 эВ для атомарных компонент, коэффициенты рекомбинации различаются почти на 6 порядков и равны 1,0 и $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ соответственно. Существование процесса перезарядки атомарных ионов на молекулярные предполагает существенную зависимость эффективной скорости рекомбинации и, соответственно, концентрации свободных электронов в ионосфере от отношения концентраций молекулярных и атомарных составляющих атмосферного газа O/N_2 и, в меньшей степени, от O/O_2 из-за количественного соотношения N_2/O_2 в атмосфере. Электронная концентрация, кроме того, зависит от скорости образования отрицательных ионов M^- в реакции, например, $O_2 + e + M \rightarrow O_2^- + M$, где M - любая нейтральная молекула. Эта реакция существенна для области D ионосферы. Данные высотного распределения эффективной частоты соударений электронов с нейтральными молекулами используются для расчётов поглощения радиоволн в ионосфере. Несомненно, основной интерес представляют именно отражённые волны. Отражение волн позволяет осуществлять связь на расстояния, намного превышающие прямую видимость. Распространение

радиоволн в ионосферной плазме, находящейся в магнитном поле Земли, имеет сложный характер. Наиболее важными параметрами ионосферы, влияющими на распространение электромагнитных волн, являются электронная концентрация и частота соударений электронов с нейтральными частицами атмосферного газа. Для исследования ионосферы используют радиоволны СВ-диапазона с вертикальным и наклонным направлением зондирования. К рассматриваемому диапазону относим частоты, меньшие наклонной критической частоты.

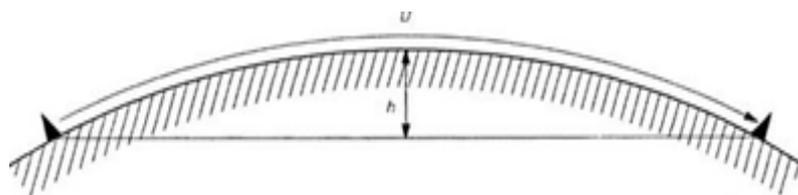


Рисунок 1.6 – Дифракция радиоволн

Отражение радиоволны будет происходить в области, где величина $\sin \theta_{i+1}$ станет равной единице. Полагая, что на поверхности земли $n_0=1$, а в области отражения излучённого с земли радиосигнала $\sin \theta_{i+1}=1$, получается, что отражение радиосигнала от ионосферы происходит на высоте, где показатель преломления равен синусу вертикального угла зондирования. Время запаздывания t , измеряемое для любой частоты ниже критической, можно перевести в «эквивалентную», или «действующую» высоту hg на основе предположения, что волна распространяется со скоростью света до ионосферы и обратно к Земле. Таким образом, $h' = ct/2$. Поэтому действующая высота h' всегда больше истинной высоты отражения h . Функция действующей высоты от частоты называется ионограммой. Из ионограммы видно, что ионосфера представляет собой слоистую структуру. Вблизи критической частоты наблюдается расщепления сигнала на обыкновенную и необыкновенную компоненты. Частоты выше критических значений не отражаются, и радиоволна проходит сквозь ионосферу. От этой модели легко совершить переход к сферически слоистой модель ионосферы.

Название слоя	Высота (км)	Концентрация заряженных частиц (см^{-3})
Слой D	60 – 90	$10^2 — 10^3$
Слой E	90 – 120	10^5
Слой F	130 - 140	$10^5 — 10^6$

Таблица 1.2 – Характеристика слоёв ионосферы

Спорадический слой E имеет свойство формироваться в абсолютно любое время. Это случается на высотах от 90 до 140 км (в области E), и может быть распространено на огромную площадь или быть ограничено до не большой территории. Практически невозможно предвидеть, где и когда это произойдет и насколько долго затянуться процесс. Спорадический E имеет свойство подобное электронной плотности по области F, имея в виду, что она имеет свойство преломлять сопоставимые частоты с областью F. Спорадическая область E используется для высокочастотной связи на верхних частотах чем, использует нормальный слой E время от времени. Время от времени спорадический слой E имеет свойство быть прозрачным и позволяет огромному числу радиоволн радиоволн проходить через него к F области, однако, иногда, спорадический слой E прикрывает область F полностью и сигнал не доходит до приемника (затенение слоев). Если спорадический слой E не полностью прозрачен, радиоволна, скорее всего будет отражена иногда от области F иногда от спорадического слоя E. Это становится причиной частичной передачи сигнала или своевременного изменения силы сигнала. Спорадический E слой на маленьких и больших широтах образуется главным образом за время одного дня и раннего вечера, и чаще встречается в течение летнего периода. На высоких широтах спорадический слой E имеет свойство формироваться в ночное время суток. Распространение происходит, когда область F принимает диффузное свойство, причиной тому является отклонение в той области, которая и рассекает радиоволну. Принятый сигнал - это наложение множества волн, отраженных от разных высот и мест расположений в ионосфере в немного разное время. В низких широтах, распространение F происходит главным образом в ночное время суток и во время равноденствий. На средних широтах, распространение F маловероятно, чем в низких и высоких широтах. Возможно, что это происходит ночью и зимой. В широтах выше чем 40 градусов, распространение области F имеет свойство быть ночным событием, когда, образуется главным образом в момент равноденствий, в то время как у магнитных полюсов распространение F часто наблюдается и днем и ночью. Во всех широтах имеется закономерность для рассеивания F, во время уменьшения в частотах области F. То есть распространение F постоянно связано с ионосферными бурями.

К приёмам, использующим аналогичный метод, относятся наклонное и возвратно-наклонное зондирование, радиопросвечивание ионосферы, метод частичных отражений и измерения прохождения радиосигналов на радиотрассах. Особого внимания заслуживают процессы некогерентного рассеяния, радиолокационные и риометрические исследования. Эти методы используются не только для изучения самой ионосферы, но также для исследования магнитосферных явлений. В частности измерение поглощения космического радиопотока благодаря риометрам в основном использовалось для исследования пространственно-временных свойств потоков заряженных частиц магнитосферного и солнечного происхождения, попадающих в

полярную и авроральную ионосферы. Абсолютное электронное содержание становится одним из главных свойств ионосферы Земли, однако, на сегодняшний день, в огромном масштабе его отслеживание не осуществляется. Аналитические модели присуждают положительную оценку этому параметру в состоянии спокойной геомагнитной обстановки, но в случае возмущенной ионосферы оценка всего электронного содержания становится значительно менее точной, что негативно сказывается на работе различных (в частности навигационных) спутниковых систем. Радиопросвечивание атмосферы благодаря сигналам спутниковых радионавигационных систем и сети наземных станций становится легкодоступным и не требующим колоссальных затрат способом отслеживания ионосферы в реальном времени. Отдельное внимание вызывают результаты доплеровского зондирования ионосферы в связи с возможным влиянием на нее акустического излучения сейсмодвижителей. Волны диапазона инфразвука могут распространяться на большие расстояния и при относительно положительных условиях (небольшом затухании и рассеянии, слабой рефракции в атмосфере) достигать высот, на которых формируются нижние слои ионосферы. Во время прохождения акустической волной области, на территории которой отражаются радиоволны, это радиоволна модулируется по фазе.

Для повышения эффекта зондирования желательно осуществлять на радиочастотах, отражаемых нижними слоями ионосферы. Во время распространения радиоволны в неоднородной среде, происходит искривление ее траектории. Если электронная плотность окажется достаточно большой, то радиоволна исказится настолько, что она возвратится на Землю. Таким образом, происходит отражение радиоволны от ионосферы. Радиоволны, отправленные с Земли в ионосферу, отражаются не на границе ионизированного газа и воздуха, а в самой толще ионизированного газа. Отражение происходит на уровне, ниже максимума электронной плотности слоя, так как диэлектрическая проницаемость должна убывать с увеличением высоты, а, соответственно, электронная плотность – увеличиваться. Свободные электроны, образовавшиеся при ионизации атмосферного газа, существенно влияют на распространение радиоволн. Ионосфера обладает свойствами проводника, имеющего сопротивление. В ней выполняются все условия распространения радиоволн, описываемые уравнениями Максвелла. Высотное распределение концентрации нейтральных молекул M и основных параметров ионосферы приведены в таблице 1.2. Различают четыре области ионосферы. В самой нижней её части (50-90 км) расположена область D. В ней может быть два слоя C и D. Слой C образуется корпускулярной компонентой галактического излучения. В образовании слоя D принимают участие, как корпускулярная радиация, так и ультрафиолетовое и рентгеновское излучение Солнца. Выше области D до 120 км расположена область E, в которой кроме нескольких регулярных слоёв E иногда образуется спорадический слой Es, появление которого не

вписывается в какие-либо закономерности. Над областью E до высот примерно 1000 км расположена область F ионосферы, в которой достигается максимальная концентрация свободных электронов. В области F также может находиться несколько слоёв, их именуют как F1, F1½ и F2. Выше области F располагается область, именуемая экзосферой. Полагая, что концентрации ионов и электронов равны $N_i = N_e$, равновесная концентрация свободных электронов N_e , определяемая скоростью ионизации q , скоростью рекомбинации $\alpha \cdot N_i \cdot N_e = \alpha N_e^2$, записывается в виде следующего уравнения: $dN_e/dt = q - \alpha N_e^2$. Эффективный коэффициент рекомбинации α' зависит от сорта иона M^+ . Основные характеристики нейтральных компонент N_2 , O_2 и O , вызывающие электронообразование, следующие: потенциалы ионизации мало отличаются друг от друга и равны 15,51 для молекулярных и 13,61 эВ для атомарных компонент, коэффициенты рекомбинации различаются почти на 6 порядков и равны 1,0 и $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ соответственно. Существование процесса перезарядки атомарных ионов на молекулярные предполагает существенную зависимость эффективной скорости рекомбинации и, соответственно, концентрации свободных электронов в ионосфере от отношения концентраций молекулярных и атомарных составляющих атмосферного газа O/N_2 и, в меньшей степени, от O/O_2 из-за количественного соотношения N_2/O_2 в атмосфере.

Таблица 1.3 – Основные параметры ионосферы

H, км	$N_e, \text{ м}^{-3}$	$A, (\text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1})$	$V_{en}, \text{ с}^{-1}$
60	7,7	1,2	7,3
70	8,2	1,5	6,6
80	8,7	-0,3	5,9
90	9,5	-0,5	5,2
100	10,8	-0,7	4,6
110	11,1	-0,9	4,1

Данные высотного распределения эффективной частоты соударений электронов с нейтральными молекулами используются для расчётов поглощения радиоволн в ионосфере. Высотные профили электронной концентрации среднеширотной ионосферы для дневного и ночного времени суток приведены на рисунке. Радиосвязь в диапазоне КВ возможна как прямым лучом вдоль земной поверхности, так и посредством радиоволн, отражённых от ионосферы. Широтная структура ионосферы определяется магнитосферно-ионосферными связями, зависит от сезона, местного времени, особенностей местной динамики атмосферы (прежде всего нейтральных ветров), фазы солнечного цикла и пр. Несомненно, основной интерес представляют именно отражённые волны. Отражение волн позволяет осуществлять связь на расстояния, намного превышающие прямую видимость. Распространение радиоволн в ионосферной плазме, находящейся в магнитном поле Земли, имеет сложный характер. Наиболее важными

параметрами ионосферы, влияющими на распространение электромагнитных волн, являются электронная концентрация и частота соударений электронов с нейтральными частицами атмосферного газа.

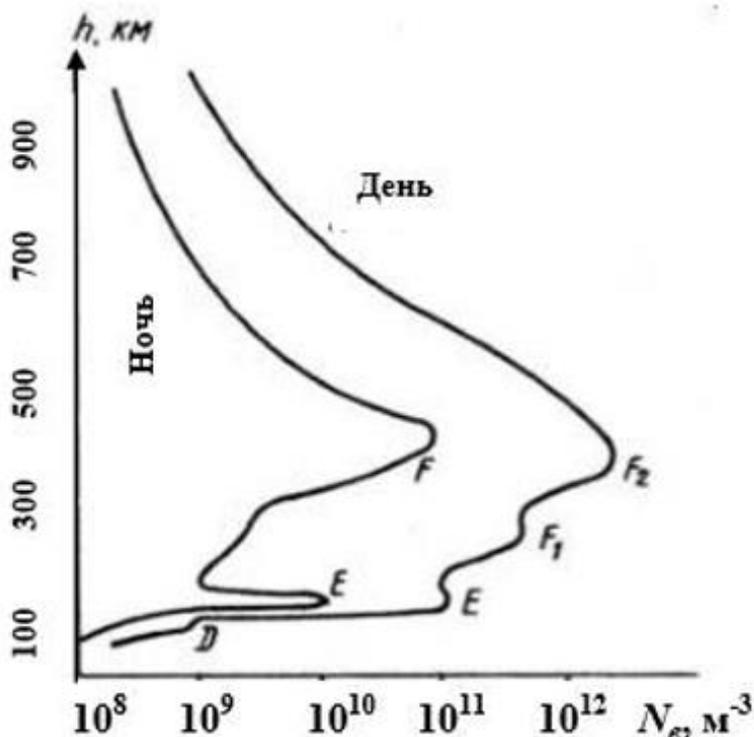


Рисунок 1.7 - Дневной и ночной профили электронной концентрации

1.4 Распространение радиоволн в свободном пространстве

Свободным пространством называют среду, параметры которой не влияют на распространение радиоволн. Распространение радиоволн в этих условиях прямолинейно, а скорость постоянна и равна скорости света в вакууме. Изучение распространения радиоволн в свободном пространстве позволяет выявить общие закономерности, присущие любому механизму распространения радиоволн. Единственным параметром, характеризующим распространение радиоволны в пространстве, является затухание с расстоянием потока мощности L_0 за счёт расширения пронизываемой сигналом площади. Действительно, на большом расстоянии от излучателя электромагнитную волну на ограниченной площадке можно считать плоской. Она имеет лишь составляющие E и H и величина вектора Умова-Пойнтинга равна

$$\Pi = [E \times H] = EH \cdot \sin(E \wedge H) = E^2 / R_x \quad (1.1)$$

где R_x - волновое сопротивление свободного пространства, называемое импедансом.

В практической системе единиц СИ для воздуха

$$R_x = E_0 / H_0 = (\mu_0 / \epsilon_0)^{1/2} = 120\pi = 377 \text{ Ом} \quad (1.2)$$

Отсюда

$$P = E^2 / 120\pi, \text{ Вт} \cdot \text{ м}^{-2} \quad (1.3)$$

где E - значение электрической компоненты напряжённости поля.
В децибелах значение L_0 определяется по формуле:

$$L_0, \text{ дБ} = 20(\lg f [\text{МГц}] + \lg d [\text{км}]) + 32,45. \quad (1.4)$$

Величину L_0 также называют коэффициентом поглощения мощности радиоволны в свободном пространстве.

1.5 Ионосферные возмущения

Можно назвать несколько причин возмущений области ионосферы, связанных с изменением интенсивности корпускулярной радиации. За первую причину изменения электронной концентрации принимают изменения соотношения нейтральных компонент O / N_2 . Второй причиной являются механизмы взаимодействия с радиационными поясами Земли. Здесь имеется также два пути влияния заряженных частиц захваченной радиации на верхнюю ионосферу. В радиационных поясах движутся ионы O^+ , протоны p и электроны e . Ионы и протоны при столкновениях с атомами кислорода O передают им в процессах обмена импульсом и резонансной перезарядки свою энергию и заряд. В результате ионы и протоны теряют свою энергию, а ускоренные атомы кислорода тратят энергию на нагрев окружающей среды и производят дополнительную ионизацию. Схема взаимодействия заряженных частиц радиационных поясов с верхней атмосферой развивается по трём каналам. В первом канале ионы кислорода O_{f+} и водорода H_{f+} (протоны) в столкновениях с атомами кислорода обмениваются скоростью и зарядами. Образовавшиеся в результате реакций быстрые атомы кислорода O_f теряют свою энергию на ионизацию атомов кислорода O . В ионизационных процессах принимают участие и электроны радиационных поясов. Реакции с образованием низкоэнергичных ионов кислорода O^+ продолжается до снижения энергии O_f , e_f и e ниже потенциала ионизации атома O . Полная скорость ионизации (интегрированная по всем энергиям для наблюдаемых событий с O^+) примерно равна $10^8 \text{ м}^{-3}/\text{с}^{-1}$ около максимума F слоя и одного порядка со скоростью ионизации солнечной электромагнитной радиацией. Атомы кислорода, увеличившие свою энергию в результате столкновений до 10 эВ, способны просто покинуть ионосферу, соответственно изменив соотношение O/N_2 . Поток убегания равен $7,5 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}/\text{с}^{-1}$, а поток, способный к выходу на баллистические орбиты, будет $2,8 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}/\text{с}^{-1}$. Эти атомы были бы результатом потока O^+ в $2,8 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}/\text{с}^{-1}$,

который в 10 раз больше, чем входящий поток O_f^+ в диапазоне 0,7-12 кэВ. Низкоэнергичные ионы O^+ и электроны вновь захватываются магнитным полем в радиационные пояса, где ускоряются и начинают участвовать во взаимодействии с атмосферным газом. То есть образуется самоподдерживающийся цикл движения атомарных ионов кислорода и электронов из радиационных поясов в ионосферу и обратно.

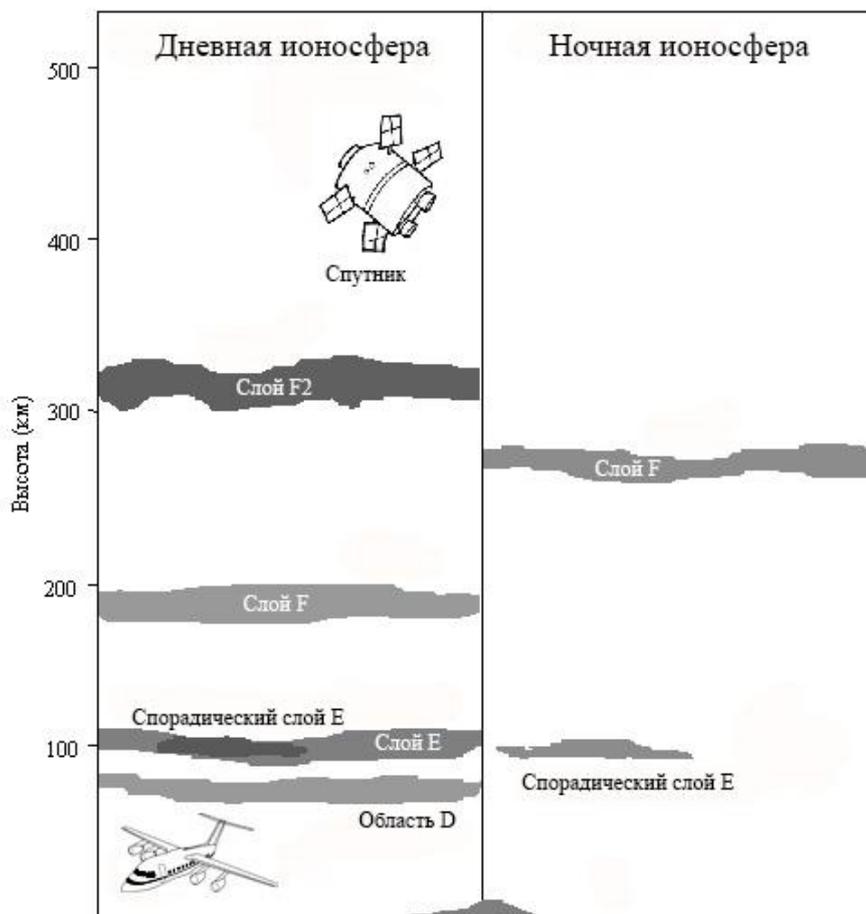


Рисунок 1.8 - Дневная и ночная структура ионосферы

В этом канале изменение ионизации в области F ионосферы однозначно изменениям концентрации заряженных частиц в радиационных поясах и, следовательно, такими же изменениями интенсивности внемагнитосферных корпускулярных потоков солнечного или галактического происхождения. Во втором канале образованные в реакциях быстрые атомы кислорода O_f теряют свою энергию на нагрев атмосферного газа. Пиковая энергетическая потеря располагается между ~250-300 км и составляет ~96 % полного поступающего энергетического потока. Для такого события величина потока поступающей энергии могла быть порядка $4 \cdot 10^{-4} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$, что по порядку энергетического потока сопоставимо с солнечным энергетическим притоком к F области. Таким образом, большие взаимные сечения передачи импульса обеспечивают очень эффективный механизм для передачи магнитосферной энергии в верхнюю термосферу. Нагрев атмосферы при возрастании концентрации заряженных частиц в радиационных поясах приводит к

расширению атмосферы и изменению отношения нейтральных компонент O/N_2 . В области разогрева отношение O/N_2 возрастает. Если высота максимума слоя F2 будет располагаться вблизи области разогрева, то электронная концентрация также будет возрастать. Если максимум ионосферы будет располагаться много ниже области разогрева, то можно ожидать уменьшение электронной концентрации. Следовательно, будут условия, когда электронная концентрация в максимуме ионосферы реагировать не будет.

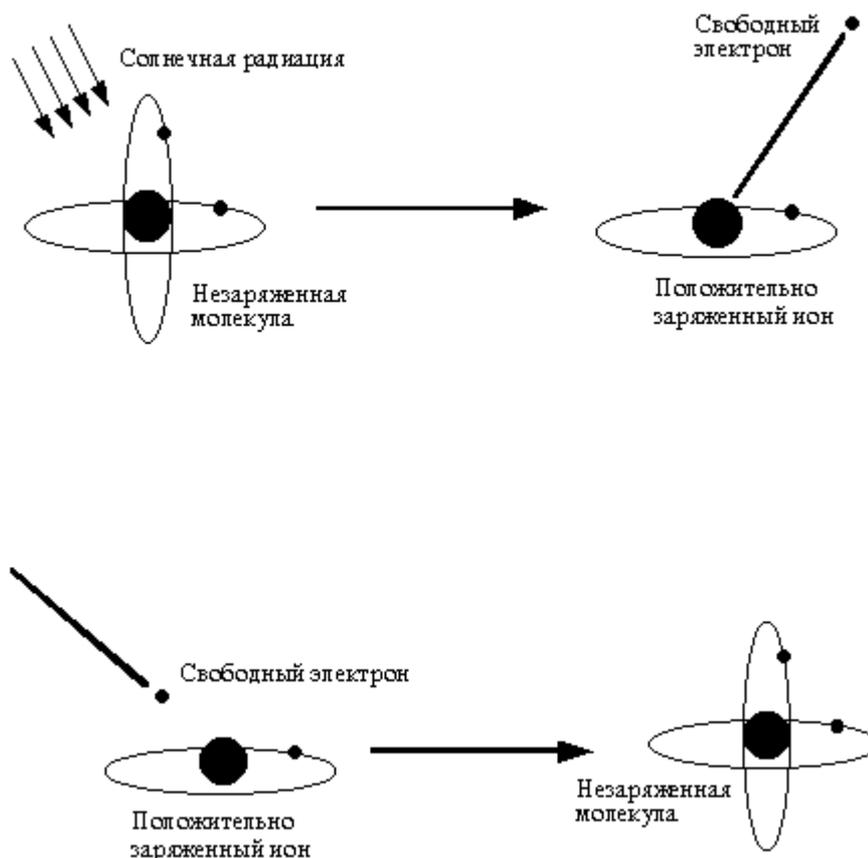


Рисунок 1.9 - Ионизация частиц

Высота максимума ионизации области F2 – $hmF2$ зависит от солнечной активности и композиций нейтральных составляющих атмосферы N_2 , O_2 , O , Ne и H . Наиболее вероятна регистрация противоположной по знаку бури (относительно интенсивности корпускулярной радиации в областях захвата) в околополуденное время зимнего периода года, когда $hmF2$ имеет наименьшие значения. Вероятность возникновения отрицательной бури ещё более уменьшается с приближением к экваториальной зоне, поскольку при этом $hmF2$ возрастает. Концентрация заряженных частиц в радиационных поясах стремится к постоянству, она пополняется как за счёт внемагнитосферных источников, так и из ионосферы. В третьем канале с увеличением потоков внемагнитосферных протонов и электронов радиационные пояса временно переполняются в сотни раз, и единственным

механизмом уменьшения вынужденного нарастания является уменьшение скорости отбора зарядов из ионосферы. При этом концентрации ионов и электронов в ионосфере будут возрастать, поскольку ионизация атмосферы на этих высотах солнечным электромагнитным излучением остаётся прежней. В периоды, например, Форбуш-эффектов электронная концентрация в области F ионосферы падает.

1.7 Возмущения корпускулярной радиации

Земная метеопогода, основными характеристиками которой являются температура, облачность или осадки, зависит от количества солнечной электромагнитной радиации, приходящей к земной поверхности. Долгопериодные и вспыхивающие изменения солнечной активности приводят к значительным по амплитуде изменениям интенсивности галактических космических лучей. ГКЛ на стратосферных уровнях вступают в ядерные реакции с молекулами атмосферного газа. Вторичные компоненты космических лучей (протоны, электроны, μ -мезоны, γ -кванты и т.д.), генерированные в этих реакциях, производят ионизацию и диссоциацию молекул атмосферного газа. Солнечная электромагнитная радиация в атмосфере поглощается молекулами озона O_3 и воды H_2O . Средняя величина этого поглощения около 3% и 10% соответственно. Поглощенная на стратосферных уровнях солнечная энергия расходуется в основном на нагрев стратосферного газа.



Рисунок 1.10 - Модель воздействия корпускулярной радиации на погоду

Таким образом, концентрации молекул озона и воды, зависящие от интенсивности потока космических лучей, осуществляют распределение солнечной радиации между стратосферой и тропосферой, определяя их

температуру, а концентрации окислов азота и кластерных ионов влияют на скорость конденсации водяных паров и образования облачности. Воздействие корпускулярной радиации на концентрацию этих компонент рассмотрено ниже. Вторичные компоненты ГКЛ производят первичную ионизацию атмосферного газа.



где ξ и ξ^* - любая ионизирующая частица вторичного космического излучения до и после процесса ионизации; M_2 и M_2^+ молекула и ион азота или кислорода. Энергичный электрон e , появившийся в реакции, способен производить повторную ионизацию. Этот электрон эффективно производит также диссоциативную ионизацию молекул азота и кислорода.



Данная реакция повторяется до потери электроном энергии ниже уровня потенциала ионизации, равного около 15 эВ. На каждый акт ионизации молекулы атмосферного газа затрачивается около 35 эВ. Образование атомарных составляющих происходит и при диссоциативной рекомбинации ионов.



Существующая положительная корреляция между интенсивностью ГКЛ и концентрациями молекул озона, а также воды может быть объяснена следующим образом. В результате диссоциации молекулярного кислорода в реакциях образуются два вида возбуждённых атомов кислорода O(3P) и O(1D). Можно ожидать, что изменения высотного профиля молекул озона и воды приведут к уменьшению поглощения солнечной электромагнитной радиации в районе нижней стратосферы и тропопаузы, к уменьшению её температуры и, естественно, к увеличению температуры в нижней тропосфере. В периоды Форбуш-эффектов в среднеширотной стратосфере наблюдается уменьшение парциального давления озона с 200 до 30 нбар. Соответственно уменьшение температуры на высотах 12-15 км достигают 5-6°C. Одновременно температура нижележащих слоев возрастает почти на 10°C. Проходящая вниз оставшаяся часть энергии расходуется на нагрев приземной атмосферы и земной поверхности. На распределение температуры в атмосфере существенное воздействие оказывает облачность, в которой поглощается около 10% солнечной радиации, а отражается вверх в зависимости от типа и плотности облаков от 20 до 80%. Скорость образования капель (снежинок) из паров воды зависит от парциального давления воды, то есть её концентрации и насыщенности, температуры нижележащего атмосферного газа и скорости восхождения потоков тёплого воздуха, а также от концентрации примесей, играющих роль центров

конденсации. Таким образом, молекулы озона и воды, концентрация которых зависит от интенсивности потока ГКЛ, осуществляют распределение солнечной радиации между стратосферой и тропосферой, определяя их температуру, а концентрации окислов азота и кластерных ионов влияют на скорость конденсации водяных паров и образования облачности. Для анализа высотной зависимости вариаций этих параметров выбраны 6-часовые данные, предоставляемые Национальным Центром прогноза окружающей среды по проекту Reanalysis-II (NCEP/NCAR, USA) за 2001 г. для региона Казахстана на 5-ти высотных уровнях, соответствующих уровням атмосферного давления: 50, 100, 300, 500 и 1000 мбар. Очевидно, что температура и относительная влажность стратосферы на высотах выше 100 мбар изменяются в противофазе, то есть наблюдается отрицательная корреляция между этими параметрами. Аналогичная картина наблюдается для высот ниже 500 мбар. В промежутке высот между 300 и 500 мбар, где осуществляется поглощение солнечной энергии озоном, знак корреляции между изменениями температуры и относительной влажности становится положительным.

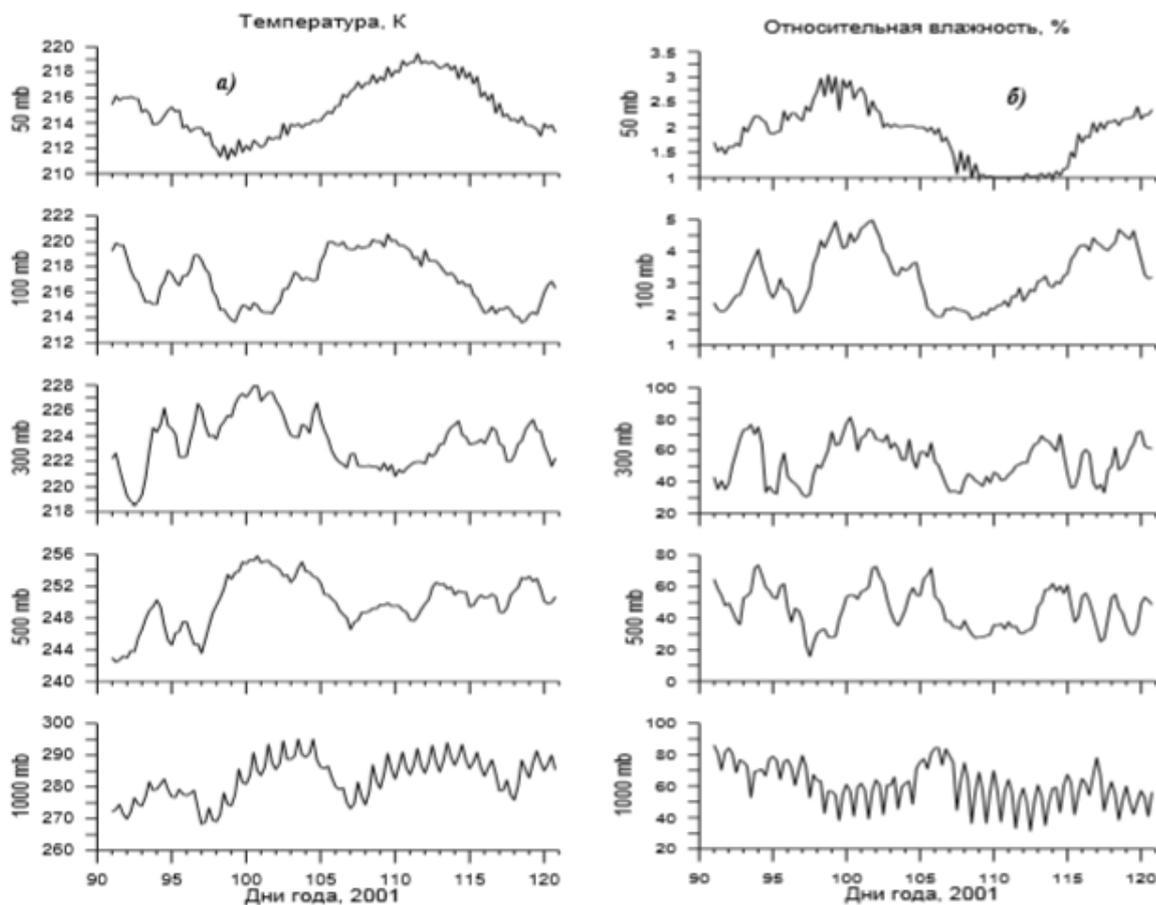


Рисунок 1.11 - Вариации температуры и относительной влажности на различных высотах атмосферы

Ниже 300 мбар наблюдается, наоборот, повышение температуры, связанное с увеличением прозрачности стратосферы электромагнитному

излучению Солнца. Так на высоте 300 мбар повышение температуры достигает 10 градусов, на высоте 500 мбар – 14 градусов, а на поверхности Земли (1000 мбар) – почти 30 градусов. Запаздывание реакции относительной влажности на изменения температуры атмосферного газа также возрастает с понижением высоты.

1.7 Средневолновые затухания

Данные затухания также называются или Внезапными Ионосферными Возмущениями. Радиация от Солнца в течение больших солнечных вспышек порождает увеличенную ионизацию в области D, которая приводит к большому поглощению волн СВ диапазона. Если вспышка достаточно большая, то весь спектр может быть непригодным на время. Затухания, более вероятно, происходят при солнечном максимуме и в первой части снижения к солнечному минимуму.

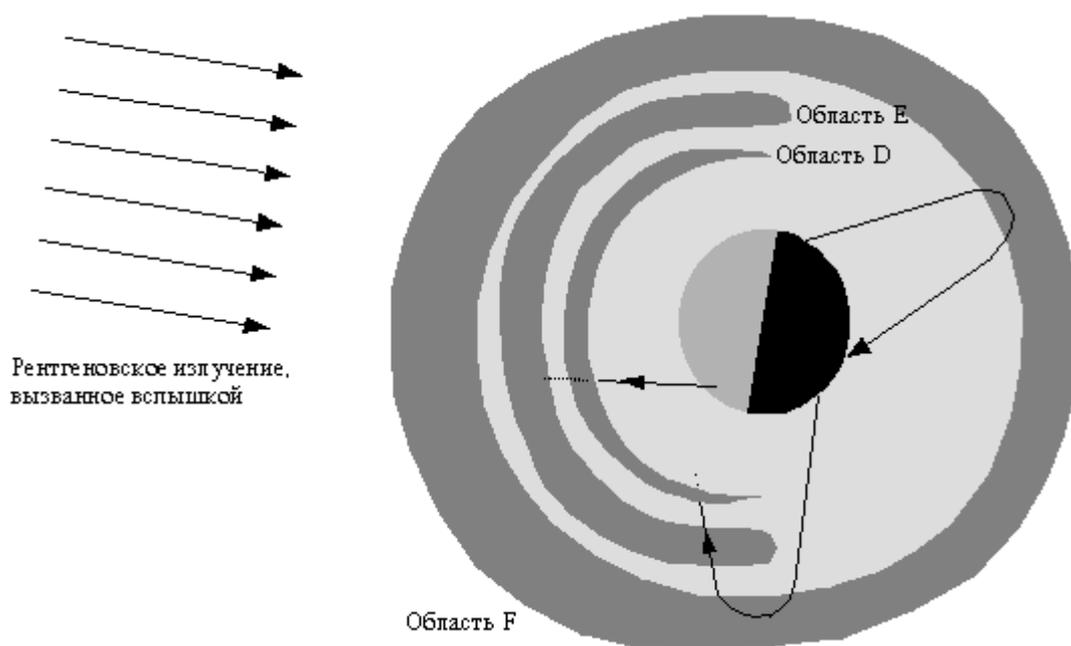


Рисунок 1.12– Затухания в области D

Главные особенности СВ затуханий:

- Воздействуют только на пути распространения со световыми секторами;
- 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 размера вспышки и положения Солнца относительно точки, где сигнал 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.

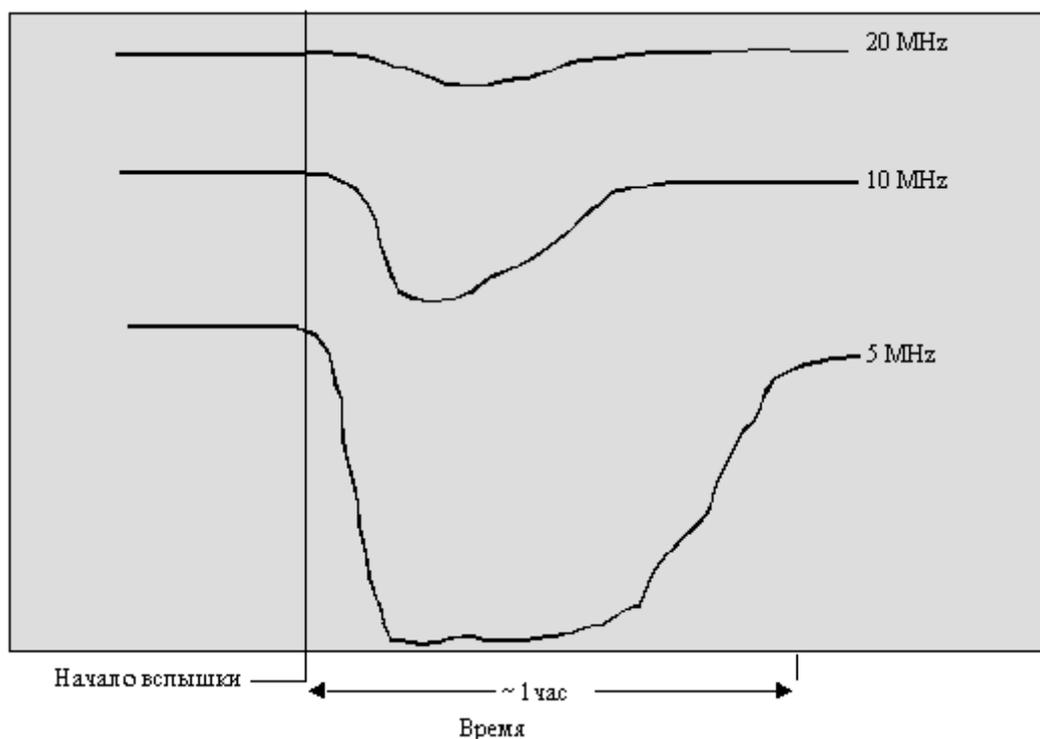


Рисунок 1.13 – Затухания низких частот

Поглощение Полярной Шапки относят к протонам высокой энергии, которые отрываются от Солнца, когда образовавшиеся вспышки переносятся по Геомагнитным линиям магнитного поля к полярным областям. Там они ионизируют область D, причиняя ослабление СВ, проходящих через полярную область D. ППШ наиболее вероятно, в момент солнечного максимума, однако, они не столь часты как затухания.

- ППШ может начинаться через 10 минут после вспышки и длиться 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.

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 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. 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 корпускулярная радиация — явление совершенно иное, чем электромагнитная радиация.

2 Экспериментальная часть

Мощные солнечные вспышки сопровождаются увеличением интенсивности электромагнитной и корпускулярной радиации. В некоторых случаях энергия этих частиц настолько велика, что позволяет им проникать через ионосферу и достигать земной поверхности. Трансионосферное распространение корпускул сопровождается процессами ионизации и диссоциации атмосферных молекул, сопровождаемое изменениями условий распространения радиоволн.

Поставлена задача определения реакции параметров радиоволн средневолнового диапазона в периоды возрастания корпускулярной радиации.

К этому диапазону относят радиоволны в частотном диапазоне от 0,3 до 3 МГц. Средние волны широко используются в системах радиовещания. Средние волны имеют несколько мод распространения: вдоль земной поверхности и через отражающую ионосферу.

Если условия распространения первой из указанных мод стационарны, то ионосферная мода подвержена ионосферным вариациям, а также зависит от протяжённости и географического расположения трассы распространения.

Возмущения ионосферы оказывают существенное влияние на поглощение и траекторию (длину пути) распространения радиоволн. Специальные исследования реакции средневолновых радиоволн в таких условиях не проводились и поэтому актуальны.

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

$$\epsilon' = (n - i\alpha)^2 = (n^2 - \alpha^2) - i2n\alpha \quad (2.1)$$

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

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4\sigma}{\omega\epsilon}} \right)} \quad (2.2)$$

Для расчётов траектории распространения радиосигнала в диспергирующей среде через закон Снеллиуса

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_{i+1}} = \frac{n_{i+1}}{n_i} \quad (2.3)$$

и поглощения энергии радиоволны

$$E = E_0 \exp \left\{ - \int_s^{s_1} \alpha ds \right\} \quad (2.3)$$

2.1 Проведение эксперимента

Для решения поставленной задачи в первую очередь необходимо выделить временные интервалы, в которых происходили мощные солнечные вспышки и в окрестностях Земли регистрировались повышения интенсивности корпускулярной радиации. Одним из таких интервалов оказался период с 20 по 27 июня 2015 года. Данные мощности солнечных вспышек и интенсивности корпускулярной радиации, полученные NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration и представленные на сайте, приведены на рисунке 2.1.

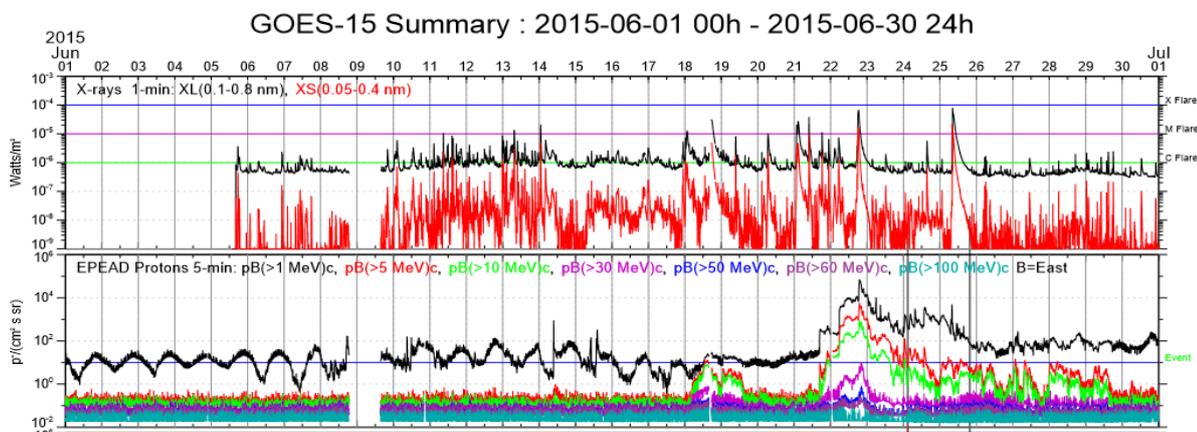


Рисунок 2.1 – Интенсивность солнечных вспышек и корпускулярной радиации за июнь 2015 г.

22 июня наблюдалась мощная солнечная вспышка, которая сопровождалась существенным повышением интенсивности корпускулярной радиации в энергетическом диапазоне 5-100 МэВ. Время достижения вспыхивающего солнечного корпускулярного потока земной траектории составляет единицы часов.

Следующим этапом исследований стал выбор экспериментальной базы распространения радиоволн средневолнового диапазона. Для этих целей был использован банк данных, полученных на измерительном комплексе БАРС.

На рисунке 2.2 приведена спектрограмма занятости эфира в исследуемом диапазоне 20 июня 2015 года.

Видно, что в этот день круглосуточно и с высокой амплитудой работали 2 радиостанции на частотах 176 кГц и 352 кГц. Именно результаты измерений принимаемых параметров станции на частоте 352 кГц используем в анализе ситуации, предварительно проведя почасовое осреднение.

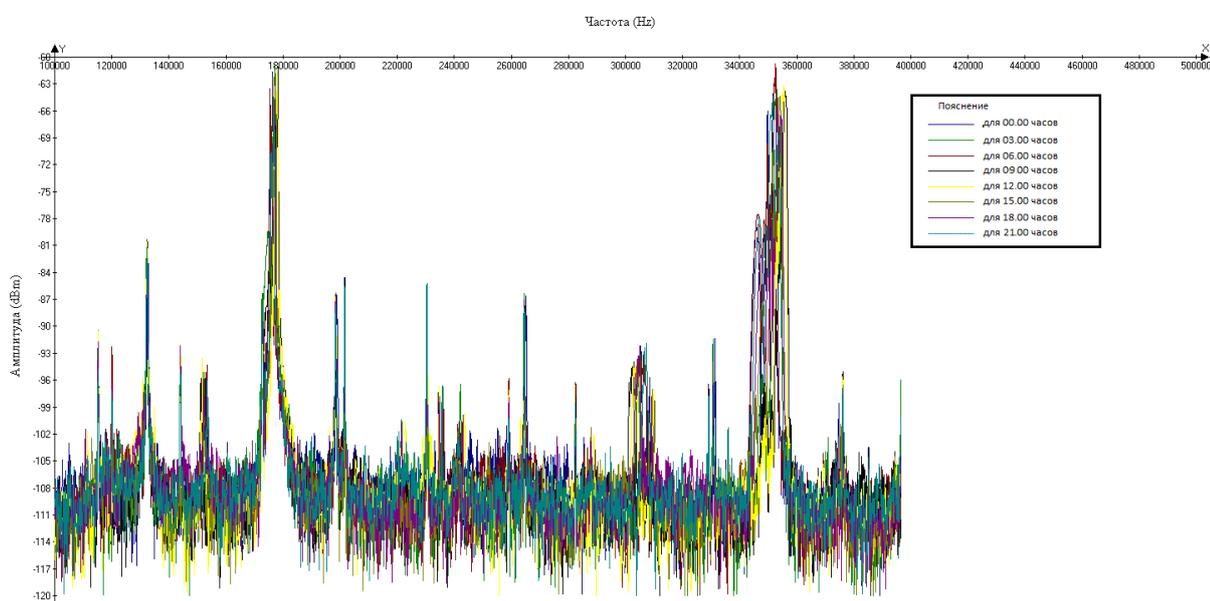


Рисунок 2.2 – Спектрограмма

Вариации сигналов характеризуют изменение распространения радиоволн и соответствующего изменения величины пути сигнала при его отражениях от нижнего слоя ионосферы, а вариации амплитуды, в основном, - изменение коэффициента затухания. На рисунке 2.3 синей линией обозначены исходные значения радиосигнала, который измеряется один раз в минуту, а красной линией – скользящее среднее с окном в 15 минут. На рисунке 3 видно, что основное воздействие на амплитуду принимаемого сигнала происходило в дневное время суток с 22 июня по 26 июня. В этот период наблюдался приход протонов солнечных космических лучей (рисунок 2.1). Мы полагаем, что достаточно большое повышение амплитуды сигнала в дневное время в период с 20 по 21 июня связано с мощными рентгеновскими вспышками, произошедшими в эти дни. Однако этот эффект не является темой данной статьи. К периоду воздействия именно корпускулярной

радиации отнесём 23-26 июня. Эффект воздействия и реакции радиосигнала заключался в уменьшении в дневное время суток амплитуды принимаемых сигналов. Величина уменьшения амплитуды сигнала составила примерно 5 дБм относительно невозмущенных периодов.

В процессе проведения исследования на частоте 132 кГц была обнаружена радиостанция в г. Ташкент.

На частоте 352 кГц была обнаружена радиостанция в г. Ашхабад (Туркменистан). Разберем первый день воздействия корпускулярной радиации. 23 июня начиная с 00:00 часов амплитуда была равна примерно (-63)дБм(объясняется отсутствием солнечного света). Ближе к 7 часам утра с появлением солнечного света, наблюдается уменьшение амплитуды до (-80)дБм. Ближе к 17 часам наблюдался обратный процесс повышения амплитуды. Это явление объясняется тем, что было зафиксировано повышение эффективности ионизации, в частности уменьшению зенитного угла Солнца над траекторией (поля радиоволны) распространения сигнала. Результатом послужило увеличение коэффициента затухания радиоволн. Процесс воздействия корпускулярной радиации наблюдался примерно с 7 утра до 17 часов вечера (длительность процесса составляла около 10 часов). Аналогичная ситуация наблюдалась до 26 июня.

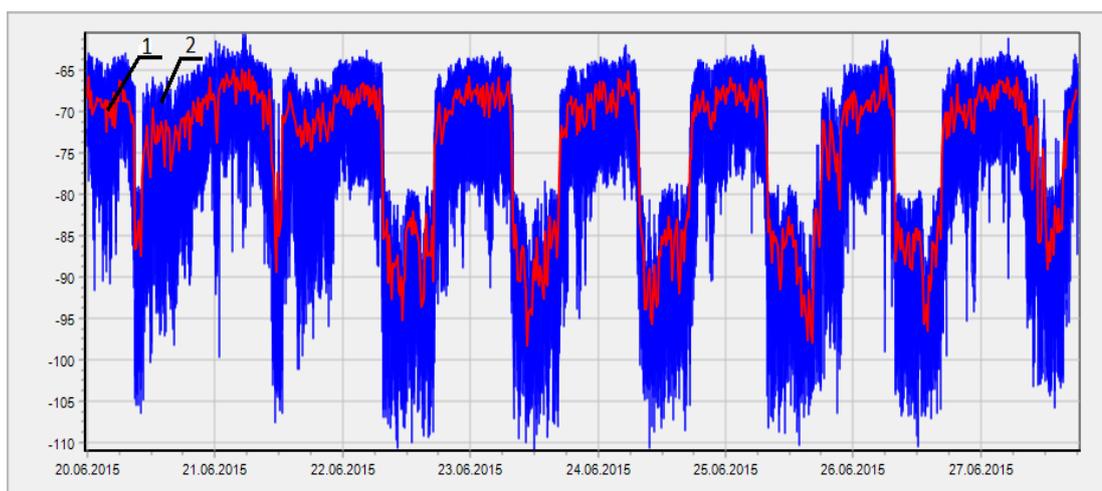


Рисунок 2.3 – Вариация радиосигнала на частоте 352 кГц

Подобная ситуация наблюдалась со второй станцией, работавшей на частоте 176 кГц. 23 июня в ночное время суток наблюдается значение амплитуды равное (-63)дБм. Ближе к середине дня произошло понижение амплитуды до (-80)дБм. Процесс воздействия корпускулярной радиации наблюдался в такое же время, как и в первом случае - с 7 утра до 17 часов вечера (длительность процесса составляла около 10 часов).

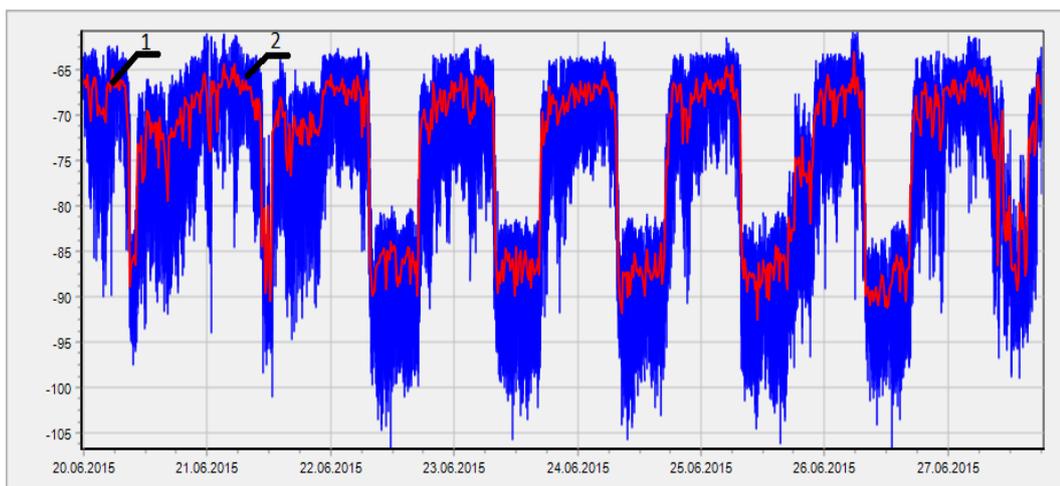


Рисунок 2.4 – Вариация радиосигнала на частоте 176 кГц

2.2 Результаты эксперимента

Корпускулярная радиация изменяет условия распространения радиоволн СВ-диапазона. Использование СВ-диапазона более эффективно в ночное время суток, когда изменение параметров наименьшее. За время проведения исследования, 22 июня наблюдалась мощная солнечная вспышка. Были зафиксированы две частоты 176 и 352 кГц. С 23 по 26 июня, наблюдался процесс воздействия корпускулярной радиации.

3 Расчетная часть

Огромный объем наблюдений за ионосферой, проводимых на земном шаре в течение нескольких десятилетий, дал огромный фактический материал. Исследование этого материала разрешает вскрыть ряд закономерностей изменения состояния ионосферы. Применяя эти закономерности, можно предугадать состояние ионосферы на огромные сроки вперед, т. е. составлять долгосрочные радиопрогнозы. Постоянно проводящиеся наблюдения за ионосферой дают возможность все большего уточнения наших знаний в этой области и, следовательно, повышения надежности радиопрогнозов. Среди различных видов долгосрочных радиопрогнозов, используемых в процессе организации и эксплуатации линий радиосвязи, наибольшее применение получили месячные прогнозы распространения радиоволн и прогнозы наименьших применимых частот для лет низкой, средней и высокой солнечной активности. Распространение радиоволн в ионосферной плазме, находящейся в магнитном поле Земли, имеет сложный характер. Особо значимыми свойствами ионосферы, воздействующими на распространение электромагнитных волн, являются электронная концентрация и число соударений электронов с нейтральными частицами атмосферного газа.

Одним из наиболее часто используемых приближений для расчетов распространения радиоволн в ионосфере является условие, при котором вектор магнитного поля лежит в плоскости распространения.

Известны многие прогностические модели ионосферы: теоретические, эмпирические и полуэмпирические. Теоретические модели занимают больших вычислительных затрат (как по ресурсам, так и по времени расчета), поэтому от них мало пользы для реализации в автоматической системе прогнозирования. От этого недостатка не свободны и полуэмпирические модели, хотя они сочетают в себе достоинства теоретических и эмпирических моделей. Поэтому в последнее время в прогнозировании большое распространение получили эмпирические модели ионосферы. Наибольшую известность имеет совершенствуемая международная модель IRI (International Reference of Ionosphere – международная справочная модель ионосферы). Последняя версия – IRI-2007 является огромной медианной моделью ионосферы (т.е. позволяет строить долгосрочные прогнозы в любой точке земного шара). Достаточно огромный круг событий, проходящих в околоземной плазме, может быть описан на кинетическом уровне с помощью функций распределения отдельных сортов частиц. Известно, что есть класс движений плазмы, закономерности которого хорошо описываются макроскопическими величинами, являющимися моментами функции распределения. Уравнения, описывающие изменения во времени и пространстве макроскопических величин, именуемые уравнениями переноса, оказываются, как правило, менее сложными для решения и, в то же время, имеют огромное количество полезной информации о движении плазмы.

Математические модели земной ионосферы могут сильно отличаться друг от друга рядом характеристик. Для описания долгопериодных средне- и крупномасштабных изменений в ионосфере пригодны гидродинамические уравнения многокомпонентной плазмы. Для данной работы преследуется цель проверки основных закономерностей распространения радиоволн в ионосфере. В ионосфере свободные электроны обнаруживаются в количестве, достаточном, чтобы повлиять на распространение радиоволн, начиная с высот порядка 50 км. Электронная плотность возрастает до высот порядка 200-400 км, где расположен ее главный максимум. Выше него плотность электронов падает. Распределение плотности электронов имеет несколько относительных максимумов, соответствующих слоям D, E и F. Состояние этих слоев подвержено суточным и сезонным изменениям. Распределение электронной плотности является случайной функцией. Слой D существует только в дневное время суток под непосредственным влиянием солнечной радиации, а ночью он исчезает. Летом слой F делится на два слоя: F1 и F2 (рисунок 3.1).

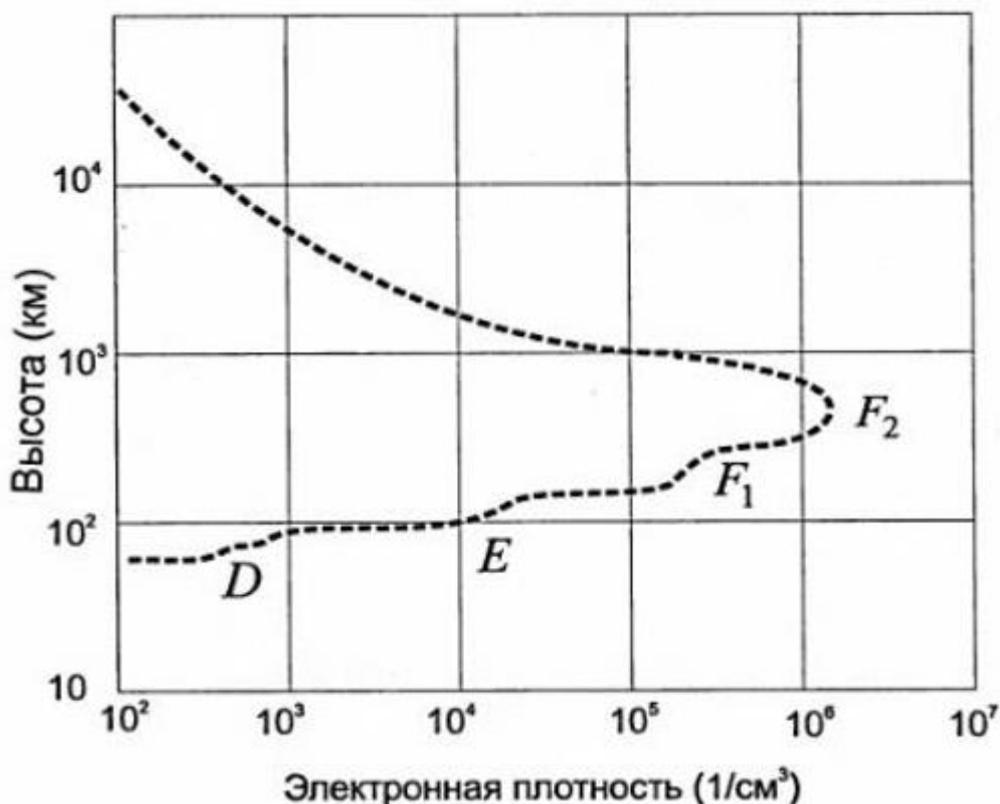


Рисунок 3.1 – Плотность электронов в ионосфере

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

$$N_y(p) = N_{yb} \left(\left(\frac{2}{Y_b} \right) - (Y^2 \cdot Y_b^2) \right), \quad (3.1)$$

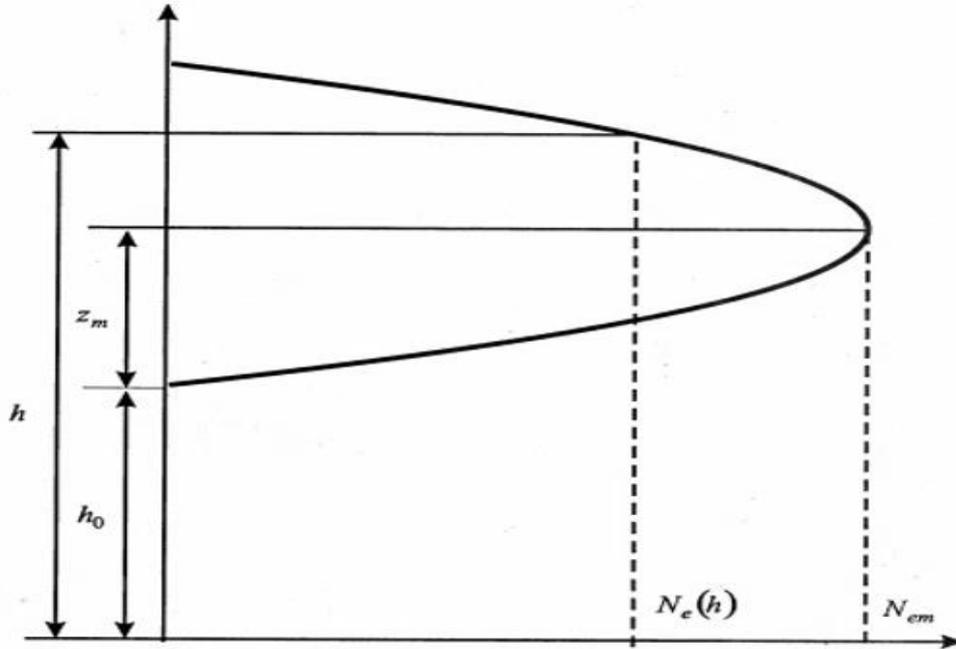


Рисунок 3.2 – Параболическая модель слоя

Электромагнитные свойства среды определяются относительной диэлектрической проницаемостью ϵ , относительной магнитной проницаемостью μ и удельной проводимостью σ . Относительная магнитная проницаемость ионосферы примерно равна 1. Под влиянием электрического поля частотой ω с напряженностью E в ионосфере возникает полный ток с плотностью, равной сумме плотностей токов смещения и конвекционного:

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

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

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

Конвекционный ток описан движением свободных электронов. Его плотность равна:

$$\delta = eN_e V_e, \quad (3.4)$$

Где V_e – средняя скорость упорядоченного движения электронов, e – заряд электрона. Сила поля, действующая на заряженные частицы равна:

$$F_j = eE \quad (3.5)$$

Упорядоченная скорость частицы обратно пропорциональна ее массе. В связи с этим благодаря тому, что масса положительных ионов в сотни

тысяч раз больше массы электрона, их влиянием можно пренебречь. Электрическая сила уравновешивается силой инерции частицы и силой трения, создаваемой за счет столкновений с другими частицами. Дифференциальное уравнение движения электрона имеет вид:

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

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

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

На высоких частотах при $\omega^2 \gg v_{эфф}^2$ и после подстановки постоянных значений 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 показывают, что: - диэлектрическая проницаемость ионосферы меньше чем диэлектрическая проницаемость вакуума. Причина лежит в конвекционном токе. При нем электроны движутся против поля. Плотность конвекционного тока вычитается из плотности тока смещения; - диэлектрическая проницаемость ионосферы зависит от электронной концентрации. Ионосфера является электрически неоднородной средой; - диэлектрическая проницаемость ионосферы зависит от частоты. Это значит, у нее есть дисперсия; - диэлектрическая проницаемость ионосферы может принимать нулевые значения, если частота поля равна собственной частоте ионосферной плазмы; - удельная проводимость ионосферы меняется по высоте. Электронная плотность максимальна в слое F и уменьшается в слое D. Число соударений в секунду существенно больше в слое D. В итоге проводимость в слое D больше. Этот слой действует только днем, соответственно потери в ионосфере днем значительно больше, чем ночью; - удельная проводимость ионосферы с ростом частоты уменьшается. Диэлектрическая проницаемость ионосферы плавно изменяется по высоте, сначала уменьшаясь в слоях D, E и F, затем увеличиваясь выше них. Распространение радиоволн в ионосфере сопровождается искривлением их траектории. Положительная рефракция во внутренней ионосфере искривляет траекторию волны, и при определенных условиях она может вернуться к земле.

Образуется выражение для электронной плотности для отражения:

$$N_e(h_{отр}) = (f^2 \cdot \cos^2 \cdot \gamma^0) / 80.8$$

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

$$F_{кр} = \sqrt{80,8N_{em}}$$

При превышении критической частоты отраженная волна может не вернуться к поверхности Земли, в результате чего образуется «мертвая зона». Нарисунке 3.4 показана «мертвая зона».

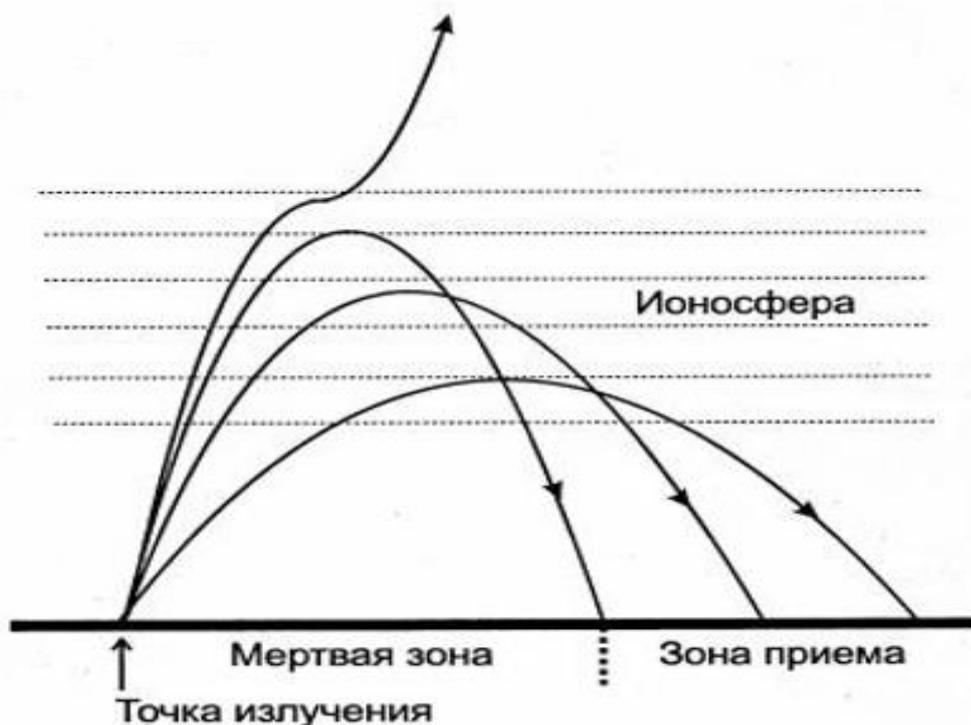


Рисунок 3.3 – Образование мертвой зоны

При анализе воздействия возмущений космической погоды на распространение радиоволн различных частотных диапазонов будем исходить модели, которая включает многолучёвость и, следовательно, интерференцию, поглощение мощности средой, а также изменение длины пути распространения. Изменение мощности принимаемого радиосигнала, в первом приближении, 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 за счёт изменения длины пути (поглощение в свободном пространстве), а ΔL – дополнительное поглощение за счёт изменения свойств среды распространения. Общее поглощение энергии радиоволны будет складываться из изменений обеих составляющих L_0 и ΔL .

Коэффициент затухания мощности радиоволны - фактор L_0 - вычисляется в предположении, что распространение радиоволн происходит в свободном пространстве, то есть между передающей и приёмной антеннами не имеется атмосферы и никаких физических препятствий. Вычисление это проводится очень легко, если известны основные свойства приёмной и передающей антенн.

Поскольку 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:

$$\epsilon' = (n - i\alpha)^2 = (n^2 - \alpha^2) - i2n\alpha \quad (3.10)$$

$$\epsilon' = -99,719$$

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

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

$$n_i = 2,905$$

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

$$\alpha = 7,893$$

Заключение

Во время проведения эксперимента (с 20 по 27 июня 2015), 22 июня была зафиксирована сильная вспышка. Данная вспышка причиной возникновения повышения корпускулярной радиации. Так же в этот день были зафиксированы две радиостанции, работавшие на частотах 176 кГц и 352 кГц. Исходя из того, что частота 352 кГц соответствует, средневолновому диапазону, был проведен анализ данных на данной частоте. Анализ проводился с помощью измерительного комплекса БАРС. Основное воздействие корпускулярной радиации приходилось на период с 20 по 26 июня 2015. В этот период наблюдалось ослабевание сигнала.

Проведенное в данной работе исследование показало, что корпускулярная радиация может оказывать влияние на качество принимаемого сигнала для волн, распространяющихся в ионосфере. Средневолновой диапазон более актуален в ночное время суток, так как в этот период он не подвергается воздействию корпускулярной радиации.

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. Результат исследования Сайт <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/>
8. Козин И.Д., Федулина И.Н. Механизмы взаимодействия радиационных поясов с верхней ионосферой // Доклады МОН РК. – 2001. - №

Приложение А

Окно программы Mathcad – Вычисление показателя преломления

The screenshot shows the Mathcad software interface with the following content:

Mathcad - [1]

Файл Правка Вид Вставка Формат Инструменты Символьные операции Окно Справка

Normal Arial 10 B I U

Мой веб-узел Go

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

Нажмите F1, чтобы открыть справку.

АВТО NUM Страница 1 14:04 14.01.2016

Рисунок А1 – Окно программы Mathcad

Приложение Б

Окно программы BARS Analysis

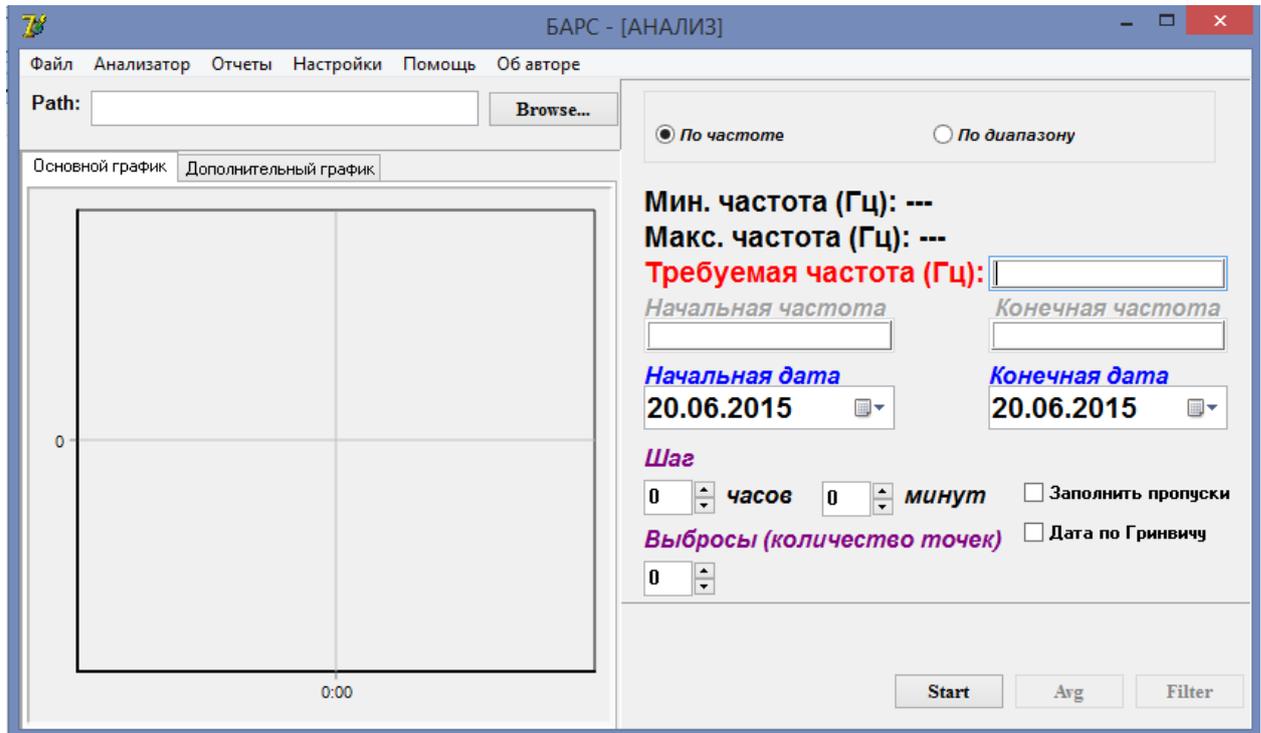
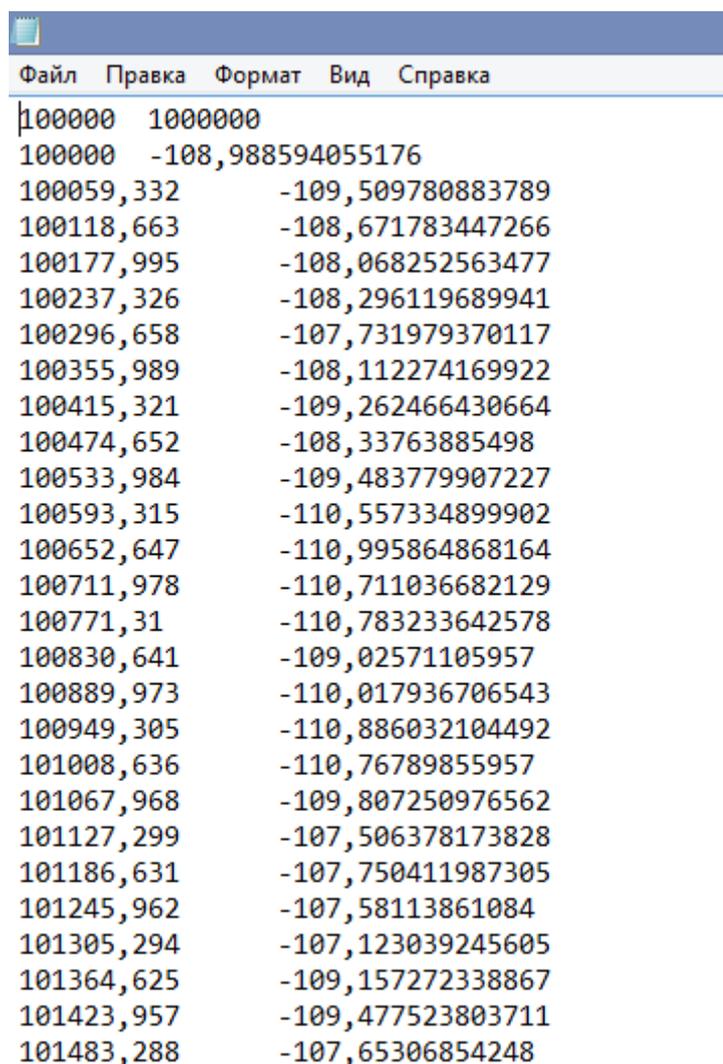


Рисунок Б1 – Окно программы БАРС

Приложение В

Окно программы фрагмент данных



Файл	Правка	Формат	Вид	Справка
100000	1000000			
100000	-108,988594055176			
100059,332	-109,509780883789			
100118,663	-108,671783447266			
100177,995	-108,068252563477			
100237,326	-108,296119689941			
100296,658	-107,731979370117			
100355,989	-108,112274169922			
100415,321	-109,262466430664			
100474,652	-108,33763885498			
100533,984	-109,483779907227			
100593,315	-110,557334899902			
100652,647	-110,995864868164			
100711,978	-110,711036682129			
100771,31	-110,783233642578			
100830,641	-109,02571105957			
100889,973	-110,017936706543			
100949,305	-110,886032104492			
101008,636	-110,76789855957			
101067,968	-109,807250976562			
101127,299	-107,506378173828			
101186,631	-107,750411987305			
101245,962	-107,58113861084			
101305,294	-107,123039245605			
101364,625	-109,157272338867			
101423,957	-109,477523803711			
101483,288	-107,65306854248			

Рисунок В1 – Фрагмент данных