

Некоммерческое акционерное общество  
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Кафедра «Телекоммуникационные системы»  
Специальность 6М071900 «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ  
Зав. кафедрой  
Байкенов А.С.  
«\_\_» январь 2015 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**  
**пояснительная записка**

на тему: «Влияние геомагнитных бурь на распространение радиоволн»

Выполнил	<u>магистрант гр. МТСП-13-1</u>	 (подпись)	Шурахметова Н.Т. (Ф.И.О.)
Руководитель	<u>к.ф.-м.н., доцент</u> (ученая степень, звание)	 (подпись)	Федулина И.Н. (Ф.И.О.)
Рецензент	<u>к.т.н., доцент</u> (ученая степень, звание)	_____ (подпись)	Дараев А.М. (Ф.И.О.)
Нормаконтроль	<u>магистр, ассистент</u> (ученая степень, звание)	 (подпись)	Зайцев Е.О. (Ф.И.О.)
Вычислительная техника	<u>к.т.н., ст. преподаватель</u> (ученая степень, звание)	 (подпись)	Ефремова Ю.И. (Ф.И.О.)

Алматы, 2015

## **Андатпа**

Осы магистрлік диссертацияда Жердің магниттік өрісінің ауытқуына КВ-сигналдардың реакциясы зерттелінген. Сынау периоды таңдалынған, жұмыстық тазалықтың таңдауы және талдау жүргізілген. Экспериментальдық мәліметтер негізінде геомагниттік дауылдардың қарқындылығына байланысты радиотолқындардың параметрлер өзгерісі зерттелінген.

Экспериментте "БАРС" көпканалды талдағышпен алынған мәліметтер қолданылған. Талдағыш барлық каналдарда бір-бірінен тәуелсіз мәліметтер базасына нәтижелерді жазумен бірге қайта-қайта спектрограммаларды түсіруге мүмкіндік береді.

## **Аннотация**

В данной магистерской диссертации исследована реакция КВ-сигналов на возмущение магнитного поля Земли. Проведен анализ и выбор рабочей частоты, выбран период испытания. На основе экспериментальных данных исследованы изменение параметров радиоволн в зависимости от интенсивности геомагнитной бури.

В эксперименте использованы данные, полученные многоканальным анализатором "БАРС". Анализатор позволяет снимать спектрограммы периодически, с записью результатов в базу данных на всех каналах независимо друг от друга.

## **Abstract**

This master's thesis studied the reaction of HF signals on the perturbation of the magnetic field of the Earth. The analysis and selection of the operating frequency is selected during the test. On the basis of experimental data to investigate changes in the parameters of radio waves depending on the intensity of geomagnetic storms.

In the experiment, using data from a multi-channel analyzer "BARS". Spectrogram analyzer allows removing periodically, recording the results in a database for each channel independently.

## Содержание

Введение	6
1 Общие положения	7
1.1 Солнечное магнитное поле и солнечная активность	7
1.2 Излучение Солнца	10
1.3 Магнитосфера Земли	17
1.4 Ионосфера и атмосфера	22
1.5 Распространения радиоволн	27
2 Расчетная часть	29
2.1 Расчет рабочей частоты	31
2.2 Закономерности распространения радиоволн в различных средах	36
3 Экспериментальная часть	42
3.1 Данные Dst - индекса по геомагнитной бури	42
3.2 Описание экспериментальной установки	43
3.2.1 Назначение изделия	43
3.2.2 Технические характеристики	44
3.2.3 Тестирование многоканального анализатора спектра «БАРС»	45
3.3 Результаты наблюдений и их анализ	46
Заключение	50
Список литературы	51
Приложение А Окно программы Bars_analys	53

## Введение

Эффекты солнечно-земных связей в распространении радиоволн носят не только возмущающий характер — многие применения радиосвязи становятся возможными только благодаря наличию ионосферы. Само существование ионизированной оболочки Земли впервые проявилось в ходе опытов по установлению дальней радиосвязи в начале XX в. Условия распространения зависят от частоты (длины) радиоволны. Многие виды естественных космических радиоисточников были обнаружены как помехи в работе различных систем связи и радиолокации. Поэтому во многих приложениях необходимо учитывать уровень шумов Галактики, Солнца, магнитосферы, ионосферы и атмосферы.

При распространении сверхдлинных радиоволн, длина которых сопоставима с расстоянием до ионосферы, имеет место волноводное (в полости между поверхностью и ионосферой) распространение. Длинные волны благодаря рефракции тоже способны огибать Землю, но с повышением частоты увеличивается их поглощение. Трудности применения этого диапазона связаны с громоздкостью и высокой мощностью антенных систем и относительно низкой скоростью передачи информации. Средние волны распространяются вдоль поверхности Земли, а в ночное время (при отсутствии поглощения в слое D) могут отражаться от слоя E ионосферы.

В диапазоне коротких волн сигналы способны распространяться на большие расстояния (несколько тысяч километров) благодаря отражению от слоя F и при использовании достаточно компактных антенн и малой мощности передатчика по сравнению с длинными волнами. На частотах превышающих 30 МГц волны проходят через ионосферу насквозь, и эти диапазоны используются для вещания и связи в зоне прямой видимости, в том числе, со спутниками.

Радио — первая область техники, в которой учет и прогноз космической погоды стали реальностью. Это было связано с существенной ролью дальней связи в коммуникациях XX в. В настоящее время акцент сдвигается к использованию более высокочастотных диапазонов, передача цифровых сигналов в которых, в целом, меньше зависит от условий внешней среды. Тем не менее, с учетом возрастающих требований к точности и количеству передаваемой информации, необходимо рассматривать все эффекты космической погоды на среду распространения и характеристики радиоволн. В данной работе будет рассмотрено влияние геомагнитных бурь на распространение радиоволн.

Целью работы является — исследование реакции КВ-сигналов на возмущения магнитного поля Земли.

## **1 Общие положения**

Солнечное воздействие, определяющее солнечно-земные связи, включает следующие факторы:

- коротковолновое солнечное УФ - и рентгеновское излучение;
- солнечные космические лучи (СКЛ);
- солнечный ветер и межпланетное магнитное поле;
- галактические космические лучи (ГКЛ), составляющие влияние межзвездной среды, традиционно рассматриваются вместе с солнечными факторами.

Солнечный ветер и коротковолновое ионизирующее электромагнитное излучение формируют плазменные оболочки Земли — магнитосферу и ионосферу. Поэтому помимо солнечных факторов в рамках СЗС рассматривают также условия, создаваемые магнитосферой и ионосферой: потоки заряженных частиц, электрические токи и пр.

Различные факторы действуют постоянно, с некоторыми вариациями (ГКЛ, солнечный ветер) или спорадически. Их воздействие, а также состояние оболочек Земли варьируется из-за цикла солнечной активности, вращения Солнца и Земли, эндогенной variability (связанной с неустойчивым турбулентным характером плазмы) солнечной атмосферы, межпланетной среды, магнитосферы и ионосферы. Спорадические явления связаны с взрывными событиями на Солнце и их действие во всей цепи СЗС может быть охарактеризовано как аномальное усиление постоянной составляющей, различного рода бури — магнитные, радиационные, ионосферные [1].

### **1.1 Солнечное магнитное поле и солнечная активность**

Солнце — основной источник энергии в Солнечной системе. Полная мощность его излучения составляет порядка  $4 \cdot 10^{26}$  Вт. Энергия, выделяемая в ходе ядерных реакций в центральной части Солнца, транспортируется к его поверхности сначала излучением, а во внешних слоях (более 0,7 радиуса) — конвективными течениями. Во внешнее пространство практически вся она испускается в виде электромагнитного излучения в тонком поверхностном слое — фотосфере. Солнечная переменность, ответственная за космическую погоду и солнечно-земные связи составляет доли процента общего потока энергии. Солнечное магнитное поле, определяющее эту переменность, генерируется в конвективной зоне потоками плазмы, модифицированными дифференциальным вращением Солнца (так называемый динамо-эффект). Периодичность изменений глобального поля (смена полярности) составляет около 22 лет. Его половина — в среднем около 11 лет — формирует цикл солнечной активности. В минимуме активности крупномасштабное поле Солнца близко к дипольному со средней величиной на поверхности порядка 1 Гс. Максимум активности связан переполюсовкой поля, во время которой его конфигурация усложняется, что может быть представлено как появление мультиполярных гармоник. На спаде

активности структура возвращается к дипольной с обратной полярностью поля. Вблизи максимума распределение магнитных полей сильно неоднородно: формируются жгуты силовых линий поля амплитудой до тысяч гаусс, которые из-за повышенной «магнитной плавучести» постепенно поднимаются к фотосфере, образуя на ней солнечные пятна — более темные (холодные) области, перенос тепла (конвекция в традиционном смысле) под которыми заторможен сильным магнитным полем. Над фотосферой, в разреженной плазменной атмосфере Солнца — короне — эти локальные магнитные поля замыкаются, формируя дуги силовых линий, видимые, в частности, по свечению плазмы в рентгеновском диапазоне (рисунок 1.1).

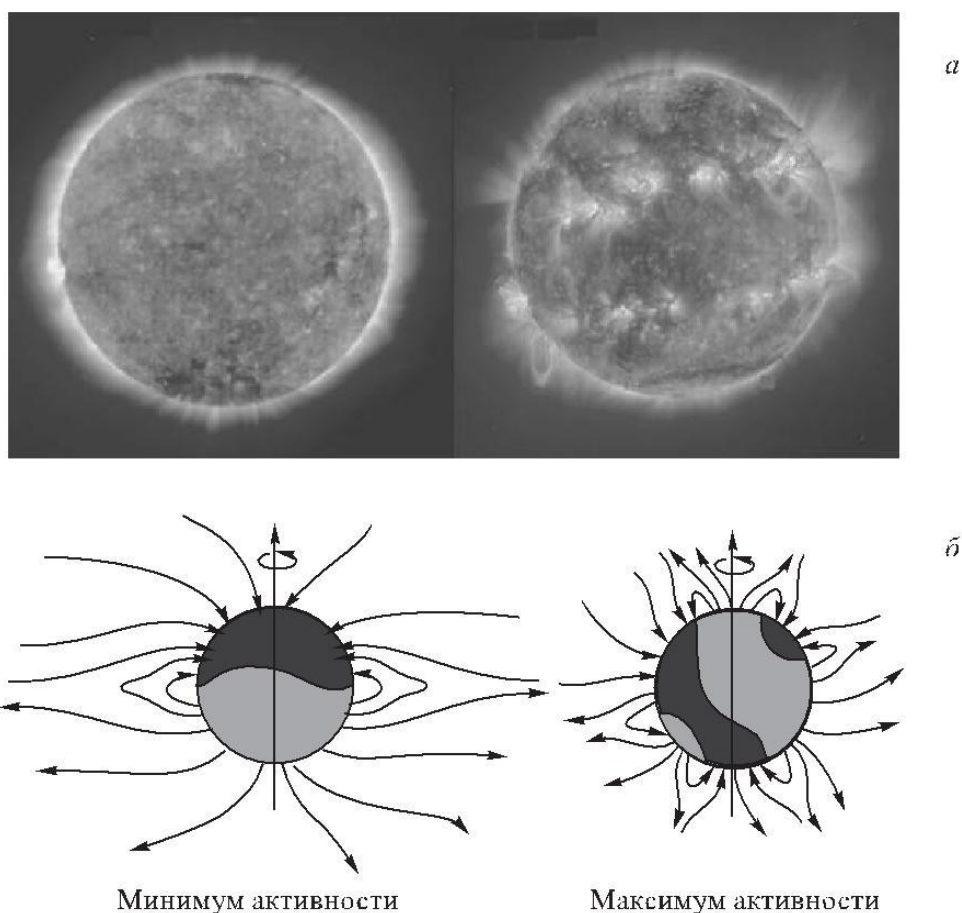


Рисунок 1.1 – Солнце в минимуме (слева, 23.01.1997) и начале максимума (справа, 9.11.1998) цикла активности

На рисунке 1.1 а - темные области у полюсов в минимуме — корональные дыры. В максимуме локальные магнитные поля формируют яркие активные области и петли в солнечной короне. (Снимки КА SOHO в полосе линии 17,1 нм). На рисунке 1.1 б - схема структуры крупномасштабного поля Солнца. Растянутая квазидипольная в минимуме (слева) и более сложная мультиполярная конфигурация в максимуме (справа).

Другая характерная структура на поверхности Солнца — корональные дыры, крупномасштабные области с магнитным полем, силовые линии которого

уходят на «бесконечность». Более крупно масштабные поля определяют структуру истечения солнечного ветра, а локальные сгустки поля представляют собой, прежде всего, резервуар свободной энергии. Характерное время динамики крупномасштабной структуры магнитного поля составляет несколько оборотов Солнца (период вращения равен 26–30 дней, в зависимости от широты).

Потеря равновесия в сложных магнитоплазменных конфигурациях над пятнами приводит к так называемым эруптивным событиям (резкому высвобождению энергии): солнечным вспышкам, солнечным протонным событиям (СПС) и выбросам плазмы (корональным выбросам массы — КВМ). Вспышки — всплески коротковолнового УФ-, рентгеновского и гамма-излучения общей энергетикой  $10^{22}$ – $10^{25}$  Дж. Наиболее мощные вспышки заметны и в белом свете. В ходе СПС генерируются нетепловые протоны (в основном) и другие частицы — солнечные космические лучи.

КВМ характеризуются выбросом в солнечный ветер больших количеств солнечной плазмы и магнитного поля ( $10^{11}$ – $10^{14}$  кг). На первом этапе КВМ наблюдаются вблизи Солнца в рассеянном свете фотосферы, а непосредственно регистрируемые проявления этих выбросов в солнечном ветре называют магнитными облаками. В настоящее время не до конца ясно насколько вспышки, СПС и КВМ взаимосвязаны, например, часть КВМ происходит и вне активных областей. Однако, наиболее мощные эруптивные события сопровождаются всеми этими.

С точки зрения баланса энергии в ходе солнечного цикла часть энергии вращения и энергии конвективных движений Солнца переходит (запасается) в энергию магнитного поля (так называемый механизм «динамо»).

С В зоне сильных полей часть ее затем высвобождается во время эруптивных событий, переходя в энергию излучения и плазмы короны, по всей видимости, посредством пересоединения (аннигиляции) противоположно направленных магнитных полей. Физические процессы, формирующие солнечную активность, не всегда ясны и являются предметом интенсивных исследований.

Самое заметное проявление солнечной активности — солнечные пятна, а их характеристики являются наиболее распространенной мерой солнечного цикла. Числа Вольфа (цюрихские относительные числа солнечных пятен) определяются как

$$R_z = k(10G + n), \quad (1.1)$$

где  $G$  — число групп солнечных пятен,

$n$  — полное число пятен,

$k$  — калибровочный коэффициент для приведения различных наблюдений к единой системе.

В максимуме активности число Вольфа превышает сотню единиц, а в минимуме приближается к нулю (рисунок 1.2).

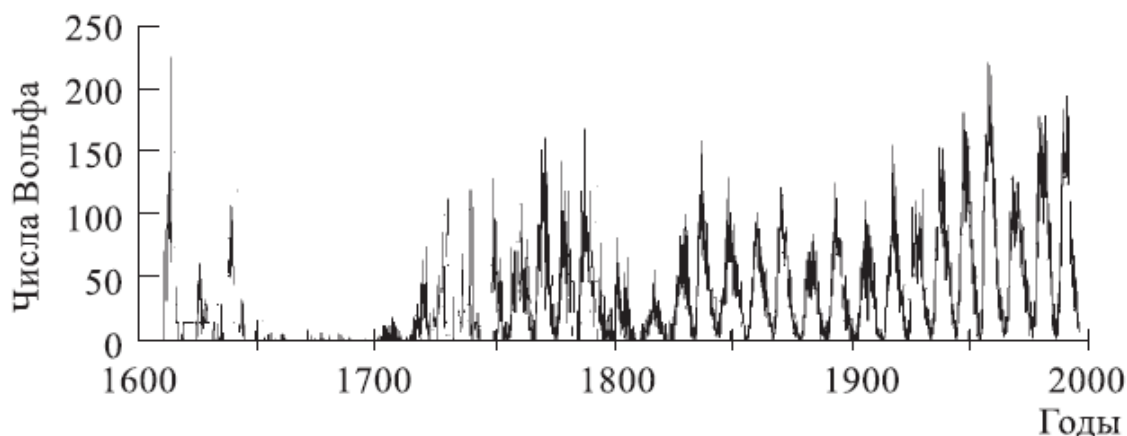


Рисунок 1.2 – Числа Вольфа за весь период наблюдений солнечных пятен

## 1.2 Излучение Солнца

Электромагнитное излучение. Полный поток солнечного излучения у Земли называется солнечной постоянной и составляет (в среднем, с учетом эллиптичности земной орбиты)  $1366 \text{ Вт/м}^2$ . В ходе 11-летнего цикла солнечной активности эта величина варьируется в пределах 0,1 %. Практически вся энергия заключена в непрерывном тепловом излучении фотосферы в диапазоне длин волн от 150 нм до 0,5 см, спектр в котором близок к спектру излучения абсолютно черного тела с температурой около 6000 К. Нетепловое радио-, рентгеновское и гамма-излучение Солнца генерируется в основном в расположенной над фотосферой хромосфере ( $T \sim 10^4 \text{ К}$ ) и в солнечной короне ( $T \sim 10^6 \text{ К}$ ) электронами и протонами, ускоряемыми вплоть до релятивистских энергий в ходе процессов, связанных с динамикой магнитного поля. С уменьшением длины волны интенсивность электромагнитного излучения быстро падает, но его вариабельность сильно увеличивается. На достаточно стабильное мягкое УФ-И (100–400 нм), поглощаемое озоновым слоем атмосферы, приходится около 9 % излучения. Солнечно-циклические вариации жесткого УФ-И (10–100 нм) составляют уже десятки процентов. Основным его источником является так называемый «средний класс» областей с повышенной светимостью [2].

По мере уменьшения длины волны растет вклад активных областей, связанных с солнечными пятнами, и на длинах волн менее 1 нм практически все излучение обусловлено ими. Более жесткое рентгеновское и гамма-излучение (< 0,2 нм) появляется в спектре Солнца всего лишь на короткое время во время солнечных вспышек.

Коротковолновое излучение задерживается атмосферой, поэтому может измеряться только на борту космических аппаратов. Для характеристики вспышечной активности Солнца удобно использовать величину потока рентгеновского излучения, так как во время вспышки его интенсивность может возрасти на несколько порядков. Вспышки разделяются на классы по пиковой



мощности, измеряемой в диапазоне 0,1–0,8 нм: класс В ( $< 10^{-3}$  мВт/м<sup>2</sup>), С ( $10^{-3}$ – $10^{-2}$  мВт/м<sup>2</sup>), М ( $10^{-2}$ – $10^{-1}$  мВт/м<sup>2</sup>), X ( $> 10^{-1}$  мВт/м<sup>2</sup>). Вспышек класса более X10 (т. е. более 1 мВт/м<sup>2</sup>) происходит порядка 10 за солнечный цикл, класса более M5 — несколько сотен [3]. Длительность вспышки — от нескольких минут до нескольких часов. Пример регистрации серии мощных вспышек в октябре 2003 г. приведен на рисунке 1.3.

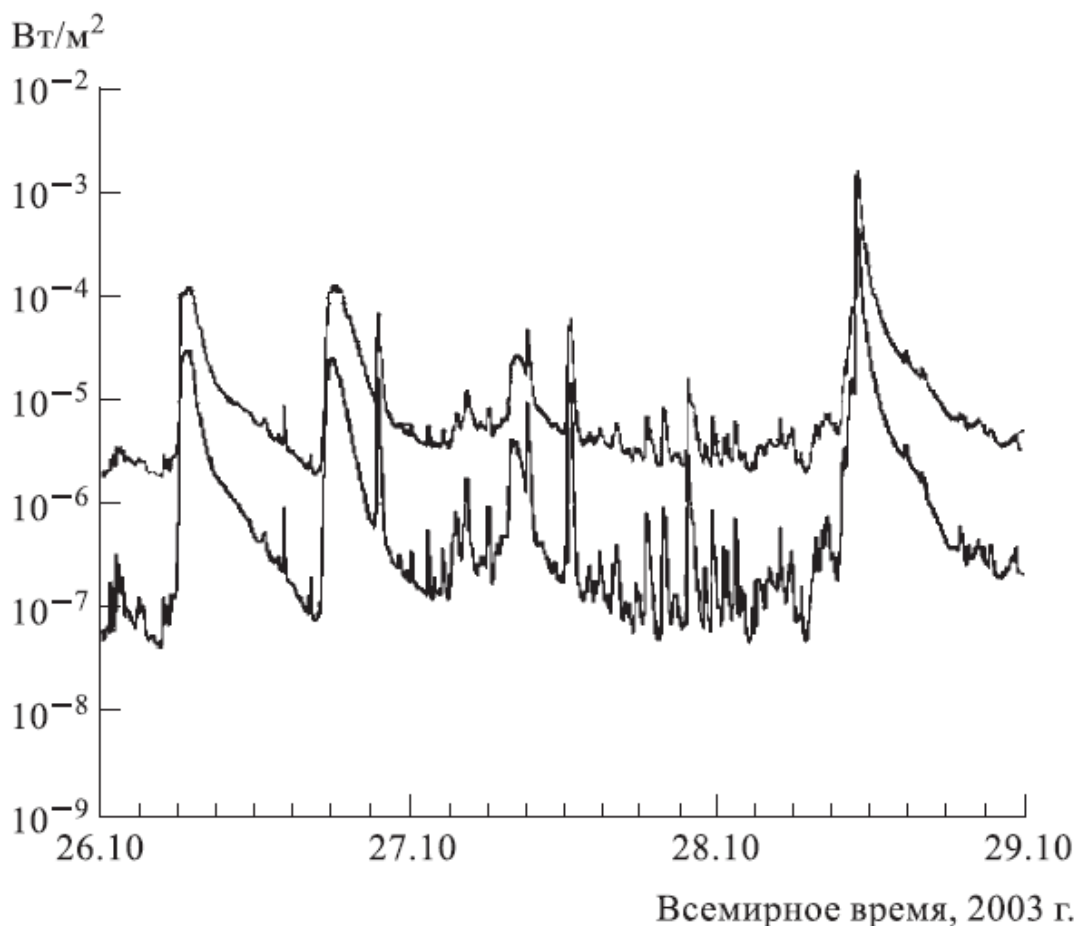


Рисунок 1.3 – Серия солнечных вспышек, зарегистрированных КА GOES в октябре–ноябре 2003 г. (данные реального времени <http://sec.noaa.gov>)

Радиоизлучение Солнца также является хорошим индикатором уровня солнечной активности. Например, поток радиоизлучения на волне 10,7 см (индекс  $F_{10,7}$ ) коррелирует с солнечным УФИ и часто используется как характеристика ионизирующего излучения Солнца.

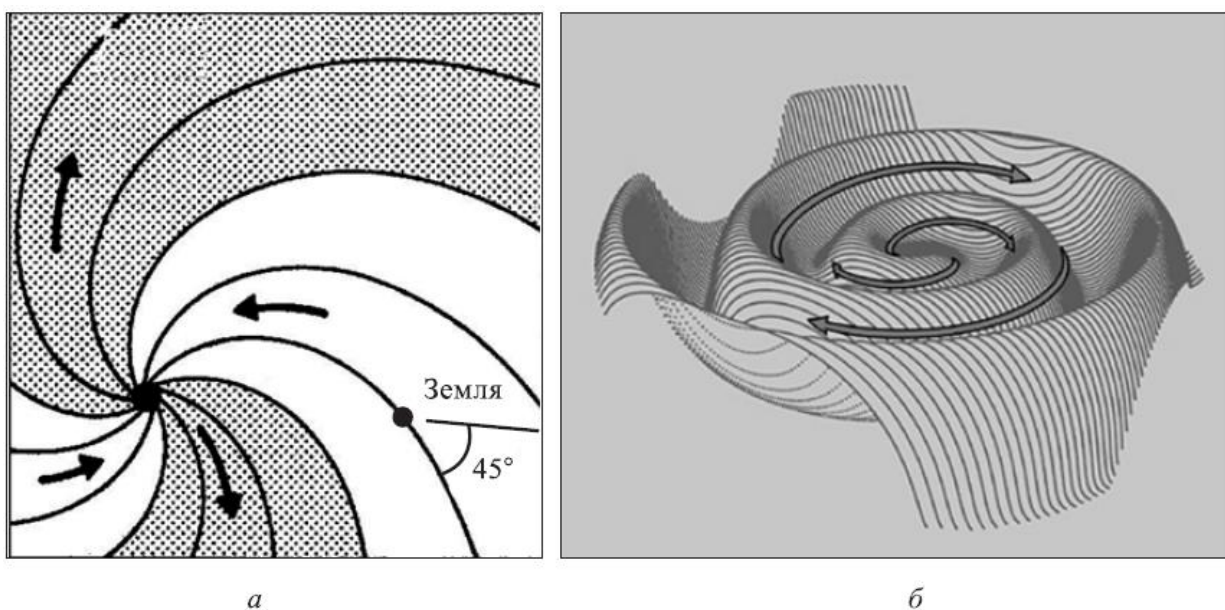
Солнечный ветер и межпланетное магнитное поле. Солнечный ветер — это поток плазмы (порядка  $10^9$  кг/с), истекающий из солнечной короны в межпланетное пространство и состоящий в основном из электронов, протонов и ядер гелия (последних в среднем  $\sim 4\%$ ). Солнечный ветер вытесняет межзвездную плазму из области с радиусом порядка 100 а. е., формируя таким образом гелиосферу.

Параметры истечения контролируются магнитным полем Солнца, которое

довольно близко к дипольному в минимуме активности. Угол наклона диполя к оси вращения Солнца относительно мал, исключая периоды длительностью 1–2 года в максимуме солнечной активности, когда происходит магнитная переполусовка. В дипольной конфигурации на высоких и средних гелиоширотах формируются корональные дыры, из которых силовые линии магнитного поля уходят на «бесконечность» (рисунок 1.1).

Из этих областей истекает быстрый и разреженный солнечный ветер, имеющий на удалении 1 а. е. скорость  $\sim 700$  км/с и концентрацию менее 5 частиц в  $\text{см}^3$ . Корональные дыры меньшего масштаба могут формироваться и на низких широтах. Вне корональных дыр структура солнечного и гелиосферного магнитного поля более сложна и характеризуется, в частности, замкнутыми силовыми линиями. Эти зоны являются источником «медленного» ветра, имеющего на орбите Земли скорость  $\sim 300\text{--}400$  км/с и концентрацию  $\sim 10 \text{ см}^{-3}$ . Межпланетное магнитное поле (ММП) формируется как сумма солнечного поля, и поля создаваемого гелиосферным токовым слоем, разделяющим зоны противоположно направленных (исходящих и входящих на Солнце в разных полушариях) магнитных силовых линий. Средняя напряженность ММП вблизи Земли составляет 5–10 нТл и зависит от фазы солнечного цикла.

Из-за высокой проводимости плазмы солнечного ветра магнитное поле вморожено в плазму, т. е. солнечный ветер уносит от Солнца не только вещество, но и магнитное поле. Из-за вращения Солнца и вмороженности магнитное поле закручено в спираль Архимеда (рисунок 1.4а). Граница между входящими и исходящими силовыми линиями проходит не точно по солнечному экватору, поэтому токовый слой в межпланетном пространстве имеет сложную форму — «юбка балерины» (рисунок 1.4б).



а — спиральная структура; б — «юбка» гелиосферного токового слоя.  
Рисунок 1.4 – Межпланетное магнитное поле

Наблюдатель, находящийся в плоскости эклиптики (на Земле), будет то выше, то ниже токового слоя. При этом будет меняться доминирующее направление вектора ММП. В этой связи говорят, что ММП имеет секторную структуру.

В целом, плотность и магнитное поле могут варьироваться по величине в десятки раз на различных пространственных и временных масштабах, что связано как с источниками на Солнце, так и с собственной динамикой плазмы, развивающейся в ходе распространения в межпланетной среде. Особенно важны аномальные усиления солнечного ветра и ММП, вызываемые различными проявлениями солнечной активности.

Корональные дыры и гелиосферный токовый слой достаточно устойчивы и могут сохранять свою конфигурацию в течение нескольких оборотов Солнца. Поэтому в заданной точке межпланетного пространства высокоскоростные потоки солнечного ветра из данной корональной дыры будут появляться примерно через каждые 27 дней. В зоне столкновения быстрого и медленного потоков солнечного ветра формируется так называемая корототирующая область взаимодействия (КОВ), которая также вращается вместе с Солнцем. Плазма, сжатая в КОВ, характеризуется высокой концентрацией более  $10 \text{ см}^{-3}$  и сильно флуктуирующим магнитным полем напряженностью более 10 нТл. КОВ вызывают так называемые рекуррентные магнитные бури, которые могут повторяться в течение многих солнечных оборотов [4].

Такая квазистационарная картина крупномасштабной структуры солнечного ветра и ММП наиболее характерна для фазы спада и минимума активности.

С ростом солнечной активности одним из наиболее ярких ее проявлений становятся корональные выбросы массы. Магнитные облака, связанные с ними, могут распространяться на фоне спокойного (фоновое) солнечного ветра со скоростями до 2000 км/с и иметь сильное и упорядоченное магнитное поле в десятки нТл. Если скорость выброса превышает скорость основного потока на локальную скорость звука, то перед ним образуется ударная волна, в переходной области за которой магнитное поле усилено сжатием. Именно такие образования вызывают самые мощные бури [5]. Пример регистрации около Земли нескольких магнитных облаков в ходе всплеска солнечной активности октября–ноября 2003 г.) представлен на рисунке 1.5.

Основным фактором, определяющим динамику магнитосферы, является величина  $z$ -компоненты ММП (далее обозначаемого как  $B_z$ ) в гео-солнечно-магнитосферной системе координат [6].

Ось  $x$  этой системы направлена на Солнце, ось  $z$  — приблизительно перпендикулярна плоскости эклиптики и отклоняется от направления в зенит синхронно с направлением геомагнитного диполя.

Компоненты ММП, лежащие в плоскости эклиптики, в значительной степени определяются крупномасштабной спиральной структурой ММП, а вертикальная компонента варьируется более свободно.

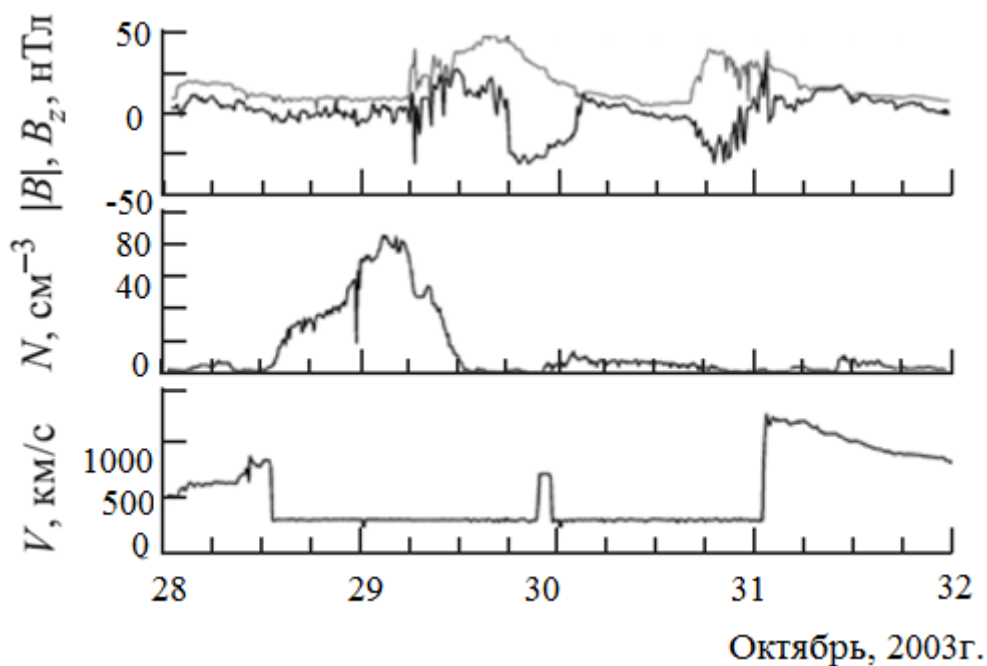


Рисунок 1.5 – Данные реального времени наблюдений солнечного ветра и ММП 28–31 октября 2003 г. на КА ACE

На рисунке 1.5 периоды магнитных облаков (сильного упорядоченного ММП) отмечены серыми прямоугольниками. Область сжатия за ударной волной и перед облаком (большая плотность и варьирующееся ММП) — черным прямоугольником. Низкие (менее 300 км/с) значения скорости связаны с отказом прибора в высоких потоках СКЛ. В действительности пиковое значение скорости было более 2000 км/с.

Солнечные космические лучи. Солнечные космические лучи (СКЛ) — это спорадически появляющиеся потоки ионов и электронов, с энергиями обычно до 10 ГэВ на нуклон. Если на орбите Земли (вне радиационных поясов) поток протонов с энергией  $> 10$  МэВ превышает  $10 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1}$ , то считается, что произошло солнечное протонное событие (СПС). СПС обычно наблюдаются после вспышек или других эруптивных явлений на Солнце (рисунок 1.6). Поэтому считается, что частицы ускоряются непосредственно во время солнечных вспышек и на ударных волнах КВМ в короне или межпланетном пространстве [7].

Полное число частиц, инжектируемых в межпланетное пространство в ходе события, может превышать  $10^{32}$ , а их суммарная энергия может быть более  $10^{24}$  Дж, что сравнимо с электромагнитной энергией солнечных вспышек. Для задач радиационной безопасности наибольший интерес представляют всплески потоков протонов с энергией  $> 30$  МэВ, пиковая интенсивность которых может достигать сотен частиц на  $(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср})^{-1}$ .

На рисунке 1.6 вертикальная пунктирная линия указывает время солнечной рентгеновской вспышки  $\sim 10 : 20$  UT (всемирного времени) 14 июля. Вертикальная штрих-пунктирная линия указывает приблизительно время

первого максимума потока протонов с энергией более 100 МэВ. Момент прихода к Земле ударной волны отмечен сплошной вертикальной линией. Шкала абсцисс в часах сначала суток 14.07.2000 г. [8].

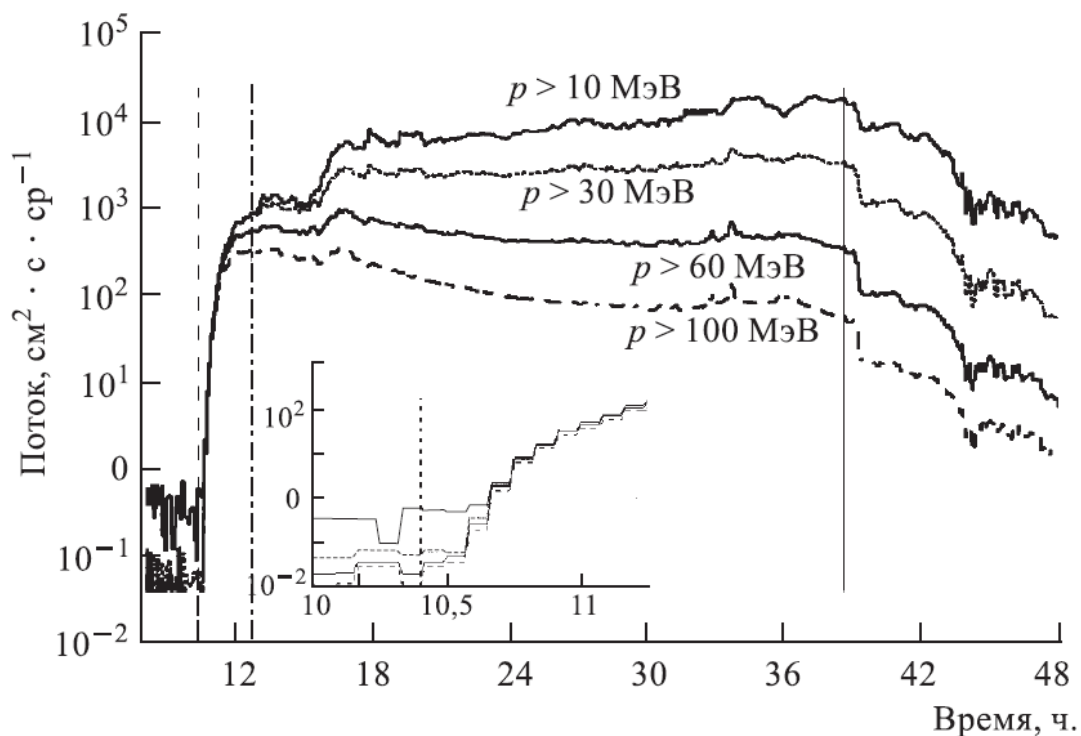


Рисунок 1.6 – Интегральные потоки протонов СКЛ, ускоренных в СПС 14–15 июля 2000 г., по наблюдениям на КА GOES-10

Энергетический спектр СКЛ в источнике, скорее всего, является степенной функцией от энергии, но спектр, наблюдаемый в той или иной точке межпланетного пространства, может отличаться от степенного. Локальный спектр и временной профиль интенсивности СКЛ определяются функцией инжекции частиц в межпланетное пространство и закономерностями распространения до наблюдателя (в частности, диффузией на неоднородностях магнитного поля). Простейшие временные профили соответствуют мгновенной инжекции протонов в межпланетное пространство на силовую линию ММП, идущую непосредственно к наблюдателю и, как правило, хорошо описывают распространение СКЛ высоких энергий (более 100 МэВ). В этом случае форма временного профиля близка к диффузионной волне с экспоненциальным ростом, дисперсией по скоростям (более энергичные частицы долетают от Солнца до Земли быстрее) и постепенным спадом интенсивности (рисунок 1.6, время прихода составляет порядка 1,5 ч). Временной профиль протонов с меньшими энергиями (~ 10 МэВ) существенно отличается от диффузионного. В то время как задержка их прихода после моментального ускорения должна составлять порядка 6 ч, в данном примере потоки продолжают расти в течение ~ 18 ч после солнечной вспышки вплоть до прихода ударной волны, что может объясняться, в частности, их дополнительным ускорением в межпланетном пространстве.

Интенсивность потоков солнечных протонов с энергией порядка 100 МэВ после наиболее мощных событий солнечного цикла спадает в течение нескольких суток, а 10 МэВ — до нескольких оборотов Солнца. Собственный фон большинства детекторов СКЛ на космических аппаратах выше уровня потоков низкоэнергичных ГКЛ.

Следует отметить, что поперечный (относительно направления магнитного поля) коэффициент диффузии КЛ в межпланетном пространстве подавлен по сравнению с продольным коэффициентом в  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  раз, поэтому СКЛ преимущественно распространяются вдоль силовой линии ММП. Поэтому, если источник СКЛ связан с земным наблюдателем силовой линией ММП, то говорят о благоприятном (геоэффективном) расположении источника.

Галактические космические лучи. Галактические космические лучи (ГКЛ) — это потоки ядер и электронов, приходящих из межзвездного пространства (Мурзин, 1988). Энергетический спектр космических лучей тянется в область сверхвысоких энергий до  $10^{20}$ – $10^{21}$  эВ. В области энергий  $10^9$ – $10^{14}$  эВ это степенная функция с показателем  $-2,75$  (для дифференциального спектра). В области энергий порядка 100 МэВ–10 ГэВ, поток энергетический спектр и угловое распределение ГКЛ модулируются гелиосферой и зависят от времени. Поток ГКЛ на этих энергиях составляет около  $10^{-4}$  см<sup>2</sup>/(с · ср · МэВ). Заряженные частицы КЛ распространяются к наблюдателю в плазме солнечного ветра, испытывая диффузию на магнитных неоднородностях, конвекцию потоком солнечного ветра (зависящую от скорости ветра) и дрейф в крупномасштабном поле. Все эти три фактора зависят от солнечной активности, а действие первых двух усиливается и препятствует проникновению ГКЛ в гелиосферу вблизи максимума. В результате поток ГКЛ, регистрируемый на Земле антикоррелирует с циклом солнечной активности.

Помимо долговременных вариаций ГКЛ, связанных с глобальными изменениями в гелиосфере в ходе цикла, существуют и кратковременные, связанные с локальной структурой солнечного ветра (КВМ, КОВ и т. д.) (рисунок 1.7)

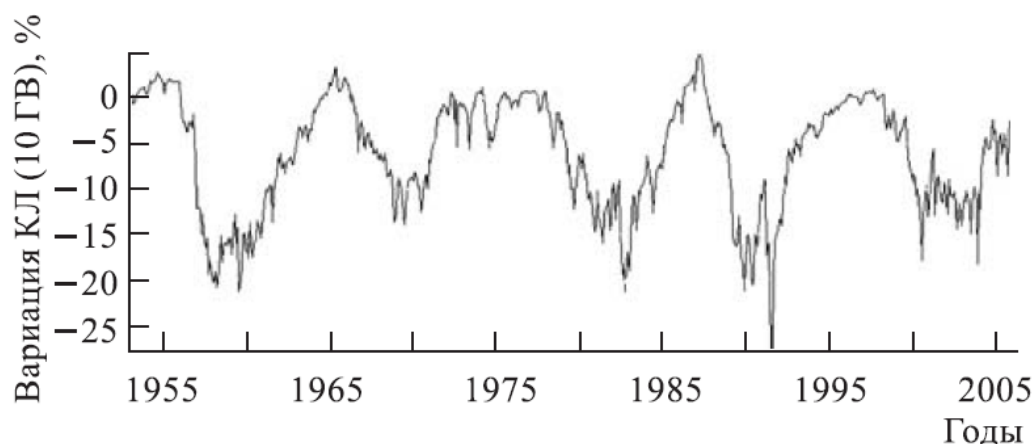


Рисунок 1.7 – Временной ход амплитуды вариаций ГКЛ на Земле (для ГКЛ с энергией более 10 ГэВ). (% к началу интервала)



Поток ГКЛ на несколько порядков меньше потоков СКЛ в максимуме СПС в сравнимой области энергий, однако, так как он присутствует постоянно, то на временном масштабе порядка года интегральный поток ГКЛ может быть сравним с потоком СКЛ.

### 1.3 Магнитосфера Земли

Динамика магнитосферы. Магнитосфера Земли формируется при обтекании солнечным ветром почти дипольного магнитного поля Земли. На дневной стороне геомагнитное поле поджато давлением солнечного ветра, и граница проходит на расстоянии порядка 60 000 км от центра Земли, а хвост магнитосферы вытянут в антисолнечном направлении на миллионы километров.

Такая искаженная относительно диполя конфигурация, создаваемая солнечным ветром, поддерживается электрическими токами, величина которых может достигать миллионов Ампер (рисунок 1.8). Выделяют пограничные слои, заполненные замедленной и нагретой на околоземной ударной волне плазмой солнечного ветра, и отделенные от собственно магнитосферы магнитопаузой — границей между ММП и геомагнитным полем.

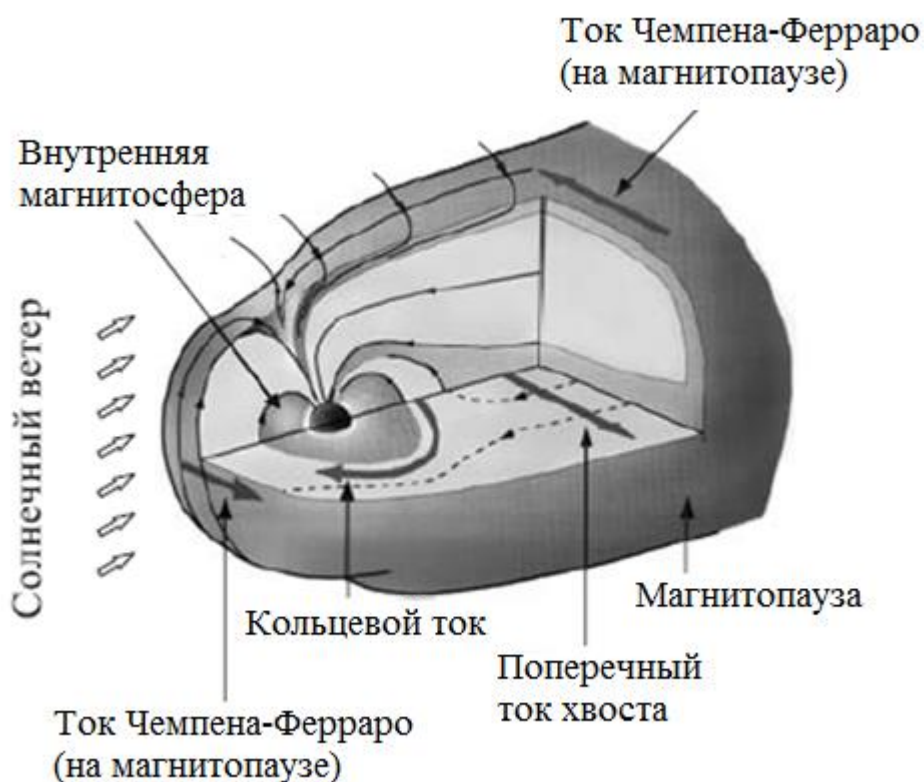


Рисунок 1.8 – Магнитосфера Земли и основные токи

Для лучшего понимания солнечно-земного взаимодействия необходимо представлять себе сопряжение магнитосферы с ионосферой и атмосферой вдоль силовых линий магнитного поля, лежащее в основе магнитосферно-ионосферных связей.

Внешняя магнитосфера, структура магнитного поля в которой определяется в первую очередь его внешними источниками — магнитосферными токами (т. е., в значительной степени, зависит от межпланетной среды) проецируется в авроральные широты (авроральный овал), в обычных условиях располагающиеся на  $65\text{--}75^\circ$  геомагнитной широты. Полярная шапка — область на широтах выше авроральной зоны, содержит открытые силовые линии магнитного поля, уходящие в межпланетное пространство. Внутренние области магнитосферы со стабильным почти дипольным полем проецируются на умеренные широты.

Хотя гидродинамическое давление солнечного ветра определяет форму магнитосферы, передача энергии по этому каналу малоэффективна, и внутренняя динамика земной магнитосферы определяется в первую очередь ММП, составляющим всего около 2 % полной энергии солнечного ветра. Как и в случае эруптивных событий в солнечной короне, ключевым механизмом динамики магнитосферы вероятно является процесс пересоединения (аннигиляции) магнитных полей. Магнитосфера открыта, если  $B_z$ -компонента ММП и геомагнитное поле на дневной стороне противоположно направлены (так называемое южное ММП,  $B_z < 0$ ). В этом случае, согласно модели Данжи (рисунок 1.9, 1.10), пересоединение противоположно направленных магнитных полей в подсолнечной зоне магнитопаузы приводит к переносу солнечным ветром магнитного потока (открытых силовых линий) с дневной стороны на ночную [9]. .

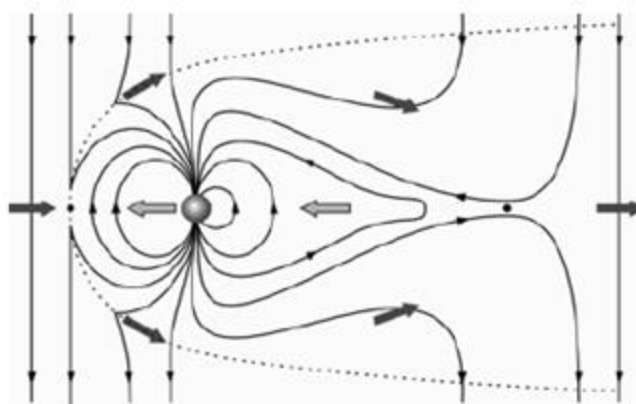


Рисунок 1.9 – Схема конвекции по Данжи при южном ММП

По мере накопления потока в хвосте (в котором магнитные поля также противоположно направлены), поперечный ток хвоста периодически разрушается и пересоединение приводит к «обрыву хвоста» — к сбросу магнитного потока и плазмы частично в межпланетное пространство и частично обратно к Земле. В результате внутренняя магнитосфера наполняется горячей плазмой и происходит возврат магнитного потока на дневную сторону. Этот круговорот, составляющий основу динамики внешней магнитосферы, называют глобальной конвекцией.

При разрушении тока хвоста часть его замыкается через авроральные



области ионосферы, формируя авроральный электроджет (рисунок 1.9). В ходе этого процесса возникает и одно из наиболее ярких проявлений магнитосферной активности — северное сияние, генерируемое в верхней атмосфере частицами, высыпаящимися вдоль авроральных силовых линий.

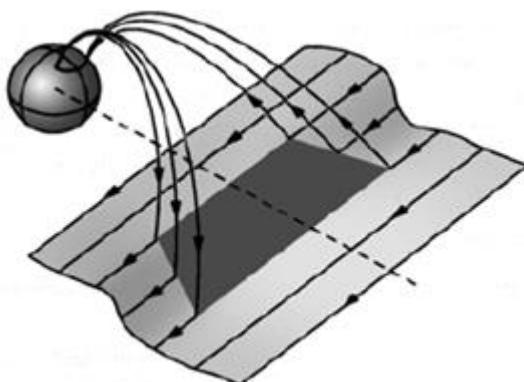


Рисунок 1.10 – Схема формирования аврорального электроджета

При северном ММП  $V_z$ -компонента ММП сонаправлена с геомагнитным полем на дневной магнитопаузе и магнитосфера закрыта. Пересоединение возможно только между противоположно направленными линиями ММП и линиями поля, выходящими из полярных шапок. Глобальная конвекция плазмы в магнитосфере относительно слаба и, в основном, связана с динамикой пограничных слоев. Конвекция характеризуется величиной электрического поля «утро—вечер» (перепадом электрического потенциала поперек магнитосферы), которое в значительной степени определяется соответствующей компонентой переносного электрического поля солнечного ветра (так называемым геоэффективным параметром):  $V \cdot V_z$  — произведением скорости солнечного ветра на  $V_z$ -компоненту ММП.

Геомагнитные возмущения, бури и суббури. Варьирующиеся условия в солнечном ветре вызывают изменения структуры магнитосферы и, соответственно, магнитосферных токов, которые проявляются на поверхности Земли как нерегулярные геомагнитные вариации. Удобно характеризовать магнитосферную динамику целом по уровню этих геомагнитных вариаций, в частности, геомагнитными индексами.

Для оценки возмущенности геомагнитного поля на данной геомагнитной станции принята логарифмическая девятибалльная шкала  $K$ , где каждому баллу соответствует определенный диапазон отклонений от кривой регулярного суточного хода поля в трехчасовом промежутке. Для оценки магнитной активности всего земного шара введен индекс  $K_p$ , получаемый осреднением по 13 обсерваториям, расположенным между  $50$  и  $63^\circ$  геомагнитной широты. Индекс  $a_p$  содержит эквивалентные амплитуды в линейной шкале. Индекс  $A_p$  определяется как среднесуточное значение  $a_p$ .

Сила авроральных токов — электроджетов — характеризуется индексами  $AU$ ,  $AL$  и  $AE = AU - AL$ .  $AU$  соответствует максимальному положительному отклонению горизонтальной составляющей магнитного поля от спокойного

уровня по всем обсерваториям авроральной зоны, а AL — максимальному отрицательному отклонению.

$D_{st}$ -индекс — мера интенсивности кольцевого тока, проявляющегося во внутренней магнитосфере только во время магнитных бурь. На земной поверхности его влияние сказывается в уменьшении горизонтальной составляющей магнитного поля. Вычисляется  $D_{st}$ -индекс по сети низкоширотных станций.

Если  $K_p$ -индекс используется для общей характеристики возмущенности магнитосферы, то AE- и  $D_{st}$ -индексы более удобны для описания основных составляющих: геомагнитных суббурь и бурь. Появление терминов «буря» и «суббуря» объясняется, прежде всего, историческими причинами. Магнитными бурями называют периоды экстремальных вариаций геомагнитного поля, регистрирующихся по всему земному шару и сопровождающихся значительными возмущениями и по всем другим каналам наблюдений (радиопомехи в ионосфере, северное сияние не только в полярных, но и в умеренных широтах и пр.). Наблюдаемые более часто магнитные вариации в полярных широтах и связанные, в том числе, с обычным северным сиянием, названы магнитными суббурями.

Со временем стало ясно, что магнитные суббури — в некотором смысле элементарный процесс, связанный с накоплением и сбросом энергии в хвосте как при обычных условиях в межпланетной среде (южное ММП в пределах 5 нТл, электрическое поле солнечного ветра до 2–4 мВ/м) так и во время бурь. Длительность изолированной суббури составляет 1–2 ч, общая энергетика — до  $10^{15}$  Дж, индекс AE — до сотен нТл, повторяемость — один раз в несколько часов.

Магнитные бури обладают значительно большей энергетикой —  $10^{16}$ – $10^{18}$  Дж и вызываются солнечным ветром с аномально большими величинами скорости, плотности, ММП [10]. Одним из общепринятых критериев начала бури считается наличие южной компоненты ММП более 10 нТл в течение не менее чем 3 ч.

Усиленное внешнее воздействие приводит к интенсификации магнитосферных токов, приводящей к распространению их влияния вглубь магнитосферы, и возрастанию суббуревой активности (AE до тысяч нТл). Поэтому во время бурь авроральная зона, в которую проецируются внешние зоны магнитосферы, сдвигается к экватору (до 40–50 магнитной широты во время очень сильных событий), что приводит к распространению зоны сияний и авроральных геомагнитных вариаций в умеренные широты. Плазма, попавшая из хвоста во внутреннюю магнитосферу, начинает дрейфовать вокруг Земли, формируя кольцевой ток на удалении 15 000–40 000 км от Земли. Его величина по индексу  $D_{st}$  является основной характеристикой бури.

Соотношение между бурями и суббурями иллюстрирует рисунок 1.10. При появлении южного ММП  $B_z \sim -10$  нТл, развивается магнитная буря, характеризующаяся индексом SYM-H (аналогом  $D_{st}$ )  $\sim -100$  нТл и длительностью более двенадцати часов. За это время зарегистрировано четыре

мощных суббури — периоды накопления и сброса магнитного потока в хвосте (регистрируемые как максимумы в магнитном давлении по данным КА IMP-8). В моменты сброса наблюдаются всплески геомагнитных вариаций на ряде станций авроральной зоны, формирующие индекс AL.

Часто бури называют периоды с  $D_{st} < -50$  нТл или  $K_p > 4$ . В солнечный максимум бури следуют раз в несколько дней ( $K_p > 5$  регистрируется порядка тысячи дней за цикл). Супербури ( $K_p = 9$ ,  $D_{st} \sim -(300-400)$ ) — происходят несколько раз за солнечный цикл.

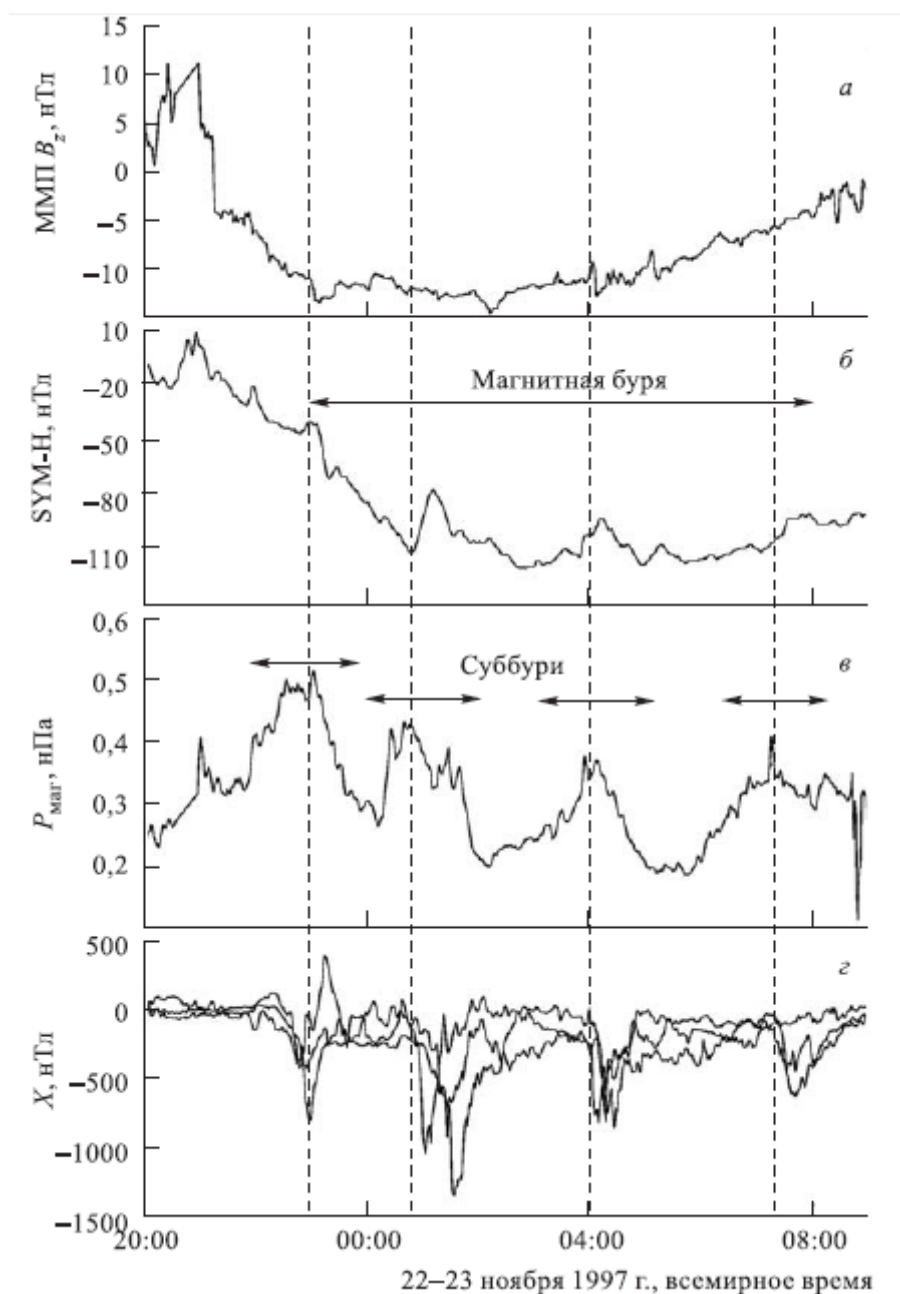


Рисунок 1.11 – Наблюдения магнитной бури и серии суббурь

Необходимо отметить, что какого-либо взаимоднозначного соотношения между различными индексами не существует, например, умеренные бури с  $D_{st} \sim$

–(100–200) могут иметь  $K_p$  от 4 до 8 [1].

На рисунке 1.11 а —  $B_z$  -компонента ММП по данным КА «Wind»; б — геомагнитный индекс SYM-H (аналог  $D_{st}$ ); в — магнитное давление (мера свободной магнитной энергии) в хвосте магнитосферы по данным КА IMP-8; г — магнитограммы ряда станций авроральной зоны. Показаны периоды магнитной бури и четырех мощных суббурь (начала помечены вертикальными линиями)

Этот факт объясняется тем, что разные индексы характеризуют различные физические явления в магнитосфере, вклад которых в динамику конкретных событий может варьироваться.

Источники рядовых суббурь в межпланетной среде — обычно собственные вариации ММП и солнечного ветра, а источники бурь — это зоны КОВ и КВМ, в которые попадает Земля. Сила рекуррентных бурь от КОВ невелика ( $D_{st}$ -вариация находится в пределах 200 нТл), но они могут длиться вплоть до нескольких суток. Это связано с относительно большой продолжительностью высокоскоростных потоков и умеренными характеристиками ММП в них (электрическое поле солнечного ветра до 6–8 мВ/м). Слабые бури с  $K_p$  3–4 могут вызываться и просто достаточно длительными высокоскоростными потоками солнечного ветра. В КВМ электрическое поле солнечного ветра может достигать десятков мВ/м и бури могут быть гораздо мощнее.

## 1.4 Ионосфера и атмосфера

Структура атмосферы и ионосферы определяется, прежде всего, высотной зависимостью. Тропосфера (до 20 км) характеризуется падением температуры с высотой, так как здесь основным источником энергии является нагрев поверхности. В стратосфере (20–50 км) температура начинает расти, что связано с поглощением солнечного мягкого УФ-излучения озоном. Выше 50 км, в мезосфере, начинается охлаждение, связанное с возможностью свободной радиации тепла в открытый космос. В термосфере (более 80–90 км) температура снова растет за счет поглощения солнечного коротковолнового излучения.

Атмосфера способна эффективно поглощать космические лучи с энергией до нескольких ГэВ/нук, порождая потоки вторичных частиц меньших энергий и элек-тромагнитное излучение. Максимумы интенсивностей вторичных частиц наблюдаются на высотах до 15 км. Ниже, у поверхности Земли основным источником ионизации воздуха являются высокоэнергичные ГКЛ. Мягкое УФИ поглощается в стратосфере. УФИ и рентгеновское излучение поглощаются в верхней атмосфере, приводя к ее ионизации и формированию ионосферы [11].

Концентрация нейтральных частиц в ионосфере всегда на порядки выше, чем ионов и электронов. Слой D (60–90 км) характеризуется слабой ионизацией (менее  $10^3 \text{ см}^{-3}$ ), создаваемой солнечным рентгеновским излучением (и эпизодически СКЛ) и почти пропадает в ночное время (рисунок 1.12).

Ниже слоя D электроны в свободном виде отсутствуют. На высотах 90–

120 км находится слой E (концентрация днем  $10^5$ , ночью —  $10^3$  см<sup>-3</sup>). Область E исключительно важна в смысле формирования магнитосферно-ионосферных связей, так как потоки высыпающихся магнитосферных частиц приводят к сильной дополнительной ионизации на этих высотах.

Здесь же замыкаются магнитосферные токи: в E-слое электроны замагничены (вморожены) — их гирочастота много больше частоты столкновений), а ионы немагничены (частота соударений сравнима с гирочастотой), что позволяет ионам двигаться отдельно от электронов поперек силовых линий магнитного поля и переносить таким образом электрический ток. Выше лежит зона F слоя, в которой на высотах 250–400 км достигается абсолютный максимум концентрации электронов.

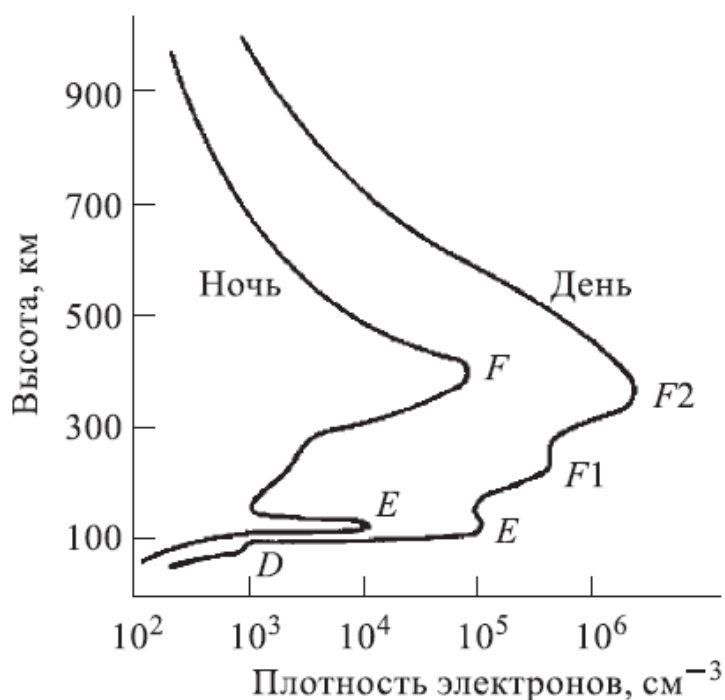


Рисунок 1.12 – Высотная структура ионосферы

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. Модельный широтный профиль максимальной концентрации для момента солнцестояния показан на рисунок 1.13

В авроральной зоне ( $65\text{--}75^\circ$ ), связанной с внешней магнитосферой, формируется локальный пик концентрации плазмы. В умеренных широтах расположен главный ионосферный провал — резкое уменьшение характерной плотности ионосферы. Он тянется до низких широт, где формируется абсолютный максимум плотности — экваториальная аномалия, имеющая двугорбую структуру (на  $\pm 20^\circ$  широты).

Во время магнитных бурь полярная шапка расширяется, авроральная зона и главный ионосферный провал сдвигаются в сторону низких широт, а горбы

экваториальной аномалии расходятся от экватора. Движение ионосферной плазмы, высыпания магнитосферных частиц, дополнительные электрические поля и токи создают условия для развития плазменных неустойчивостей и, как результат, формирования неоднородностей электронной концентрации различных пространственных масштабов. Наиболее интенсивные неоднородности тяготеют к авроральной зоне и экваториальным широтам. Развивающиеся в E-слое две токовые системы — авроральный и экваториальный электроджеты приводят к сильному разогреву плазмы. В ночной авроральной зоне неоднородности электронной концентрации формируются во основном из-за варьирующих и неоднородных высыпаний магнитосферных частиц, становящихся основным источником ионизации.

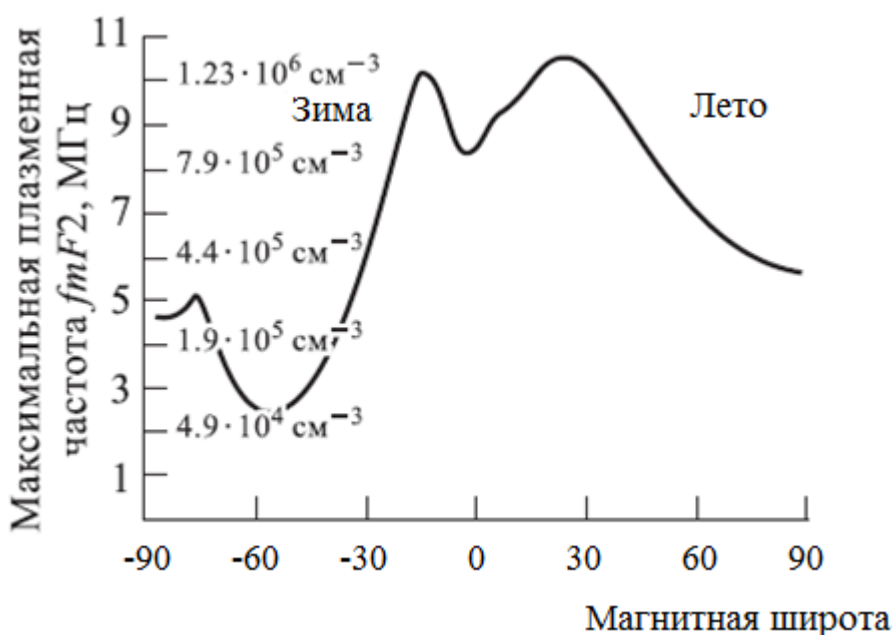


Рисунок 1.13 – Модельный профиль широтной структуры ионосферы в единицах максимальной плазменной частоты и плотности плазмы

В экваториальной ионосфере магнитные возмущения приводят к резкому усилению интенсивности формирования неоднородностей в результате развития плазменной неустойчивости Рэля—Тэйлора [12]. Более разреженная холодная плазма нижней ионосферы начинает «всплывать» вверх в более плотную и горячую плазму области F, образуя так называемые «пузыри» пониженной плотности (plasma bubbles) [13].

Образование ионосферы. Свободные электроны, образовавшиеся при ионизации атмосферного газа, существенно влияют на распространение радиоволн.

Ионосфера обладает свойствами проводника, имеющего сопротивление. В ней, как раз, выполняются все условия распространения радиоволн, описываемые уравнениями Максвелла. Высотное распределение

концентрации нейтральных молекул  $M$  и основных параметров ионосферы приведены в таблице 1.1.

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  $E_s$ , 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.

Т а б л и ц а 1.1 - Изменения с высотой дневных параметров ионосферы

h, км	Десятичные логарифмы, lg		
	Ne, м <sup>-3</sup>	a, (м <sup>-3</sup> с <sup>-1</sup> )	$v_{en}$ , с <sup>-1</sup>
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
120	11,1	-0,8	3,7
150	11,3	-1,1	3,0
200	11,4	-1,4	2,1
250	11,7	-2,3	1,5
300	11,9	-3,2	1,0
400	11,6	-4,3	0
500	11,3	-4,8	-1

Состав и высотное распределение параметров атмосферы. Состав и концентрации молекул атмосферы неоднородны по высоте. Основная часть нейтральных молекул состоит из  $N_2$  и  $O_2$ , но выше 200 км начинают преобладать атомарные компоненты, в основном O. На высотах более 500 км основной компонентой атмосферного газа являются атомы водорода H, поэтому сама область получила название протоносферы.

Нейтральную атмосферу условно разделяют на ряд высотных областей по характеру доминирующих в них процессов. Верхние границы некоторых из этих областей, называемые «паузами», привязывают к особенностям высотного профиля температуры нейтрального газа (рисунок 1.14).

Тропосфера - самая нижняя область атмосферы с отрицательным высотным градиентом температуры (примерно  $-7^\circ/\text{км}$ ). Она простирается от поверхности Земли до тропопаузы, где градиент  $T$  обращается в нуль. Высота тропопаузы максимальна на экваторе ( $\sim 18$  км), где её температура минимальна ( $\sim 190$ , К), и минимальна у полюсов ( $\sim 8$  км) при температуре  $\sim 220$ , К. В тропосфере формируются основные погодные явления.

Стратосфера - область с положительным высотным градиентом температуры от тропопаузы до стратопаузы ( $50 \pm 5$  км), на которой температура достигает величины  $270 \pm 20$ , К. Рост температуры в стратосфере обусловлен наличием в ней слоя озона, эффективно поглощающего солнечное ультрафиолетовое излучение. В связи с этим употребляется термин озоносфера, означающий область, примыкающую к максимуму концентрации озона, расположенному на высоте порядка 30 км. В противоположность тропопаузе на экваторе температура стратопаузы выше, чем наблюдаемая в полярных областях.

Мезосфера - область высот от стратопаузы до мезопаузы ( $85 \pm 5$  км), в которой температура вновь падает с высотой, достигая на мезопаузе абсолютного минимума ( $\sim 180$ , К).

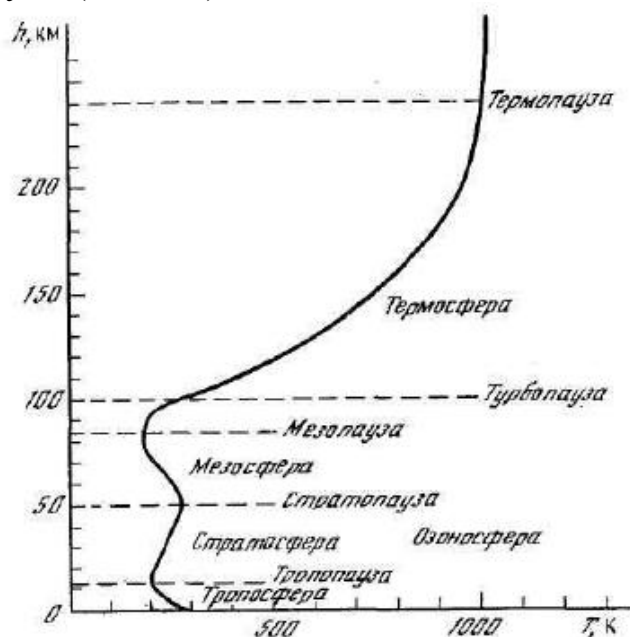


Рисунок 1.14 - Высотный ход температуры нейтрального газа и характерные высотные области нейтральной атмосферы

Термосфера - область с положительным высотным градиентом температуры, расположенная над мезопаузой. В термосфере с увеличением высоты рост температуры замедляется и, наконец, выше некоторой высоты, называемой термопаузой, прекращается, атмосфера становится изотермичной по высоте, испытывая, однако, вариации по горизонтальным координатам. Высота термопаузы минимальна при низкой солнечной активности ( $\sim 200$  км) и максимальна при высокой солнечной активности ( $\sim 500$  км). Соответствующие минимальные и максимальные значения температуры в



области изотермии составляют  $\sim 500$  и  $\sim 2000$ , К при характерном среднем значении  $\sim 1200$ , К.

Экзосфера. Основа экзосферы – приблизительно между 500 км и 750 км. Здесь атомы кислорода, водорода и гелия (приблизительно 1 процент которых ионизирован), формируют нейтральную атмосферу, в которой газовые законы становятся недействительными. Нейтральный гелий и водородные атомы, которые имеют низкие атомные веса, могут убежать в космос, так как шанс на молекулярные столкновения, отклоняющие их вниз, становятся меньше с увеличением высоты. Водород образуется при диссоциации (разрушении) водяного пара и метана ( $\text{CH}_4$ ) на высотах мезопаузы, в то время как гелий – ядерным воздействием космической радиации на азот и медленным, но устойчивым разрушением радиоактивных элементов в земной кор

### 1.5 Распространения радиоволн

Радиосвязь в диапазоне КВ возможна как прямым лучом вдоль земной поверхности, так и посредством радиоволн, отражённых от ионосферы. 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 [14].

Траектория распространения радиоволны зависит от целого ряда параметров (используемый частотный диапазон, рельеф местности, высота установки антенн, электромагнитные и нейтральные свойства среды) и может быть точно определена только в результате экспериментальных измерений или адекватными модельными расчётами.

На рисунке 1.15 приведены основные траектории распространения радиосигналов.

В пределах прямой видимости (луч 2) распространяются сигналы всех диапазонов, а СВ-, ДВ- и СДВ- сигналы из-за эффекта дифракции распространяются за пределы горизонта. Радиоволны, имеющие частоты меньше плазменной частоты ионосферы, отражаются от неё (3 и 4 - однокачковое распространение сигналов, причём  $f_3 > f_4$ ; 5 - двукачковое распространение). Луч, отражённый от земной поверхности, обозначен цифрой 6. Радиоволны УКВ диапазона распространяются в космическое пространство через ионосферу (трансатмосферное распространение – луч 1).

Для исследования ионосферы используют радиоволны КВ-диапазона с вертикальным и наклонным направлением зондирования.

К рассматриваемому диапазону относим частоты, меньшие наклонной критической частоты.

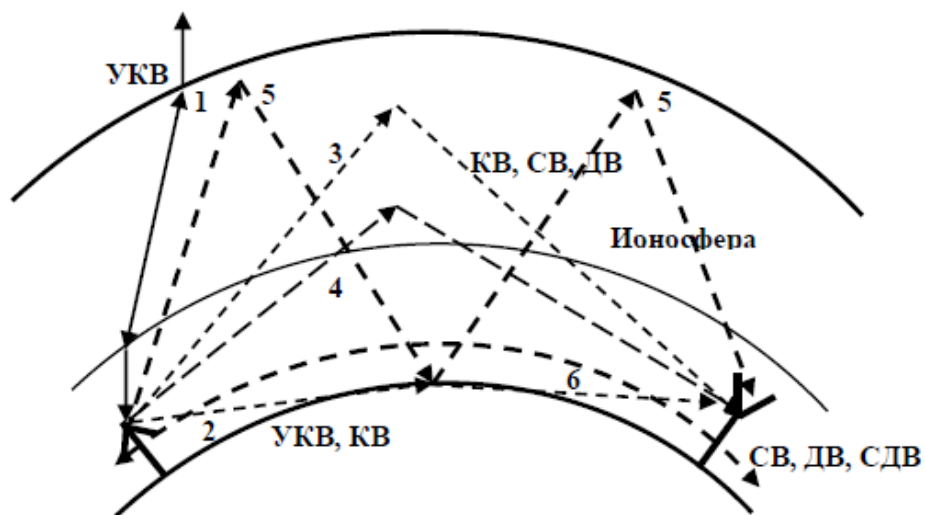


Рисунок 1.15 - Основные траектории распространения радиоволн

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  $\sin \theta_{i+1} = 1$ , то нетрудно убедиться, что отражение радиосигнала от ионосферы происходит на высоте, где показатель преломления равен синусу вертикального угла зондирования  $n_r = \sin \theta_0$ .

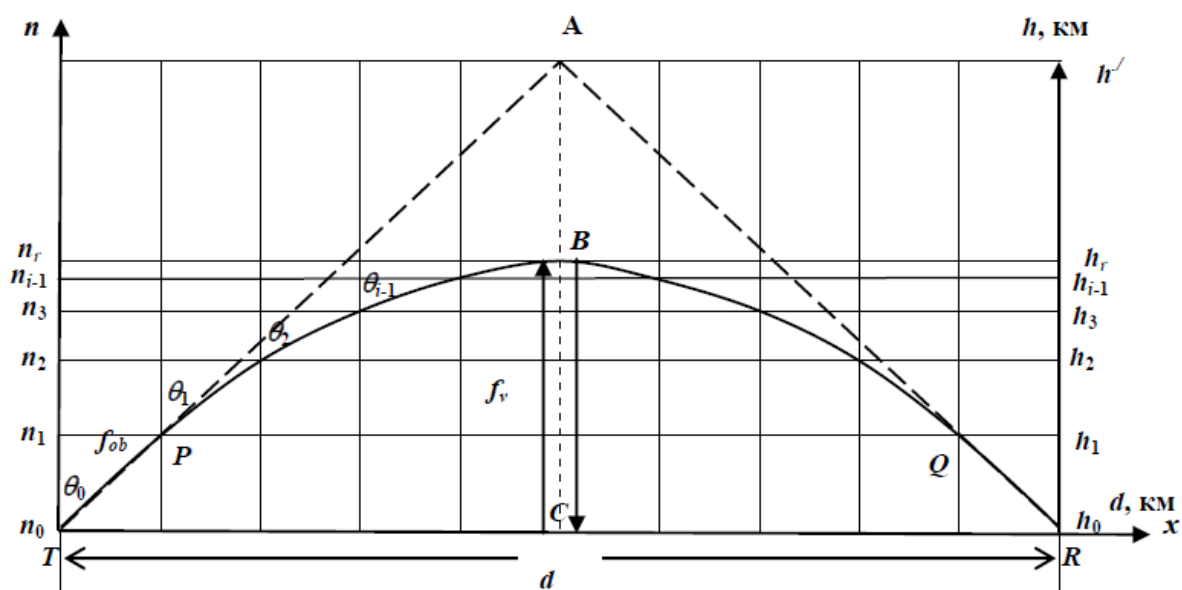


Рисунок 1.16 - Плоскостлойная модель ионосферы

Время распространения радиоволны по траекториям TAR и TBR одинаково (рисунок 1.16). Меньший по протяжённости путь TBR компенсируется меньшей скоростью распространения радиоволны из-за отличия величины показателя преломления от единицы [15-17].

## 2 Расчетная часть

Как показано в работах [18-20], на величину комплексной диэлектрической проницаемости ионосферной плазмы, кроме частоты радиоволны, влияют напряжённость магнитного поля и угол между направлениями магнитной силовой линии и распространением радиоволны.

В магнитоактивной ионосфере диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  является тензором.

В декартовой системе координат тензор  $\varepsilon$  записывается в виде матрицы

$$\|\varepsilon\| = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{vmatrix}, \quad (2.1)$$

Величины  $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{xy}, \dots$  называются компонентами тензора электрической проницаемости  $\|\varepsilon\|$ .

Материальное уравнение в этом случае имеет вид:

$$\vec{D} = \|\varepsilon\| \varepsilon_0 \vec{E}, \quad (2.2)$$

Проекция вектора  $\vec{D}$  в декартовой системе координат записываются в следующей форме:

$$\begin{aligned} D_x &= \varepsilon_{xx} E_x + \varepsilon_{xy} E_y + \varepsilon_{xz} E_z, \\ D_y &= \varepsilon_{yx} E_x + \varepsilon_{yy} E_y + \varepsilon_{yz} E_z, \\ D_z &= \varepsilon_{zx} E_x + \varepsilon_{zy} E_y + \varepsilon_{zz} E_z. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Характеристиками среды являются величины:  $\varepsilon_a = \varepsilon \cdot \varepsilon_0$ ,  $\mu_a = \mu \cdot \mu_0$  и  $\sigma$ , где  $\varepsilon$  и  $\mu$  - относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости, а  $\sigma$  - проводимость среды.

На заряд, движущийся в магнитном поле, действует сила, которую можно назвать магнитной. Эта сила должна зависеть от величины заряда  $q$ , его скорости и величины магнитного поля  $\mathbf{B}$ .

Эксперимент показал, что сила, действующая на заряд, движущийся в магнитном поле, равна

$$\vec{F} = k_2 q [\vec{v}, \vec{B}], \quad (2.4)$$

Эту формулу можно считать определением магнитной индукции  $\mathbf{B}$ . Одна Тесла определяется так, чтобы коэффициент  $k_2$  в формуле был равен единице в системе СИ. Тогда

$$\vec{F} = q[\vec{v}, \vec{B}], \quad (2.5)$$

Модуль магнитной силы равен

$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha, \quad (2.6)$$

где  $\alpha$  - угол между векторами  $v$  и  $B$ .

Направлена эта сила перпендикулярно как скорости частицы, так и направлению магнитного поля. Для положительного и отрицательного зарядов направление магнитной силы противоположно.

Наиболее важным в этом случае является то, что в силу перпендикулярности магнитной силы направлению скорости ( $F \perp v$ ), работы эта сила совершать не может, а, следовательно, и не может изменить модуль скорости заряда. Если в пространстве существуют одновременно и магнитное и электрическое поля, то сила, действующая на заряд, равна

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}], \quad (2.7)$$

Это выражение получило название силы Лоренца.

Радиус вращения  $R_L$  вокруг силовой линии, обычно называемый ларморовским. Период обращения  $T_L$  составляет

$$T_L = 2\pi \frac{mc}{ZeB}, \quad (2.8)$$

где  $m$  - масса частицы,

$c$  - скорость света,

$Ze$  - заряд частицы,

$v_{\perp}$  - составляющая скорости, перпендикулярная к магнитному полю.

Частота вращения заряженной частицы вокруг магнитной силовой линии называется гирочастотой  $\omega_H$  и влияет на величину диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ .

Вариации характеристик сигнала в ионосфере определяются комплексной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon'$ , связанной с показателем преломления  $n$  и поглощения  $\alpha$  следующим выражением:

$$\epsilon' = (n - i\alpha)^2 = (n^2 - \alpha^2) - i2n\alpha. \quad (2.9)$$

При этом выражение для комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  принимает вид:

$$\epsilon' = \epsilon_0 \left( n^2 - \alpha^2 - i2n\alpha \right), \quad (2.10)$$

где знак «+» перед корнем в знаменателе выражения (2.10) даёт решение для обыкновенной, а знак «-» - для необыкновенной компоненты радиосигнала.

В этом выражении (2.10)

$$u = \frac{\omega_H^2}{\omega^2}, \quad (2.11)$$

где  $\alpha$  - угол между векторами магнитного поля и направлением распространения радиоволны.

Значит, на распространение радиоволн в ионосфере оказывают влияние как величина вектора магнитного поля, так и взаимное расположение магнитной силовой линии и трассы распространения радиоволны.

При магнитных бурях оба параметра испытывают изменения.

## 2.1 Расчет рабочей частоты

Для постановления эксперимента выбрано устройство № 21650694 многоканального спектроанализатора «Барс» с диапазоном частот 5,95 – 11 МГц. В приложении А приведено окно программы Bars\_analys, с помощью которой графически представлен выбранный диапазон. Для выбора рабочей частоты с помощью программы Advanced Grapher был задан выбранный диапазон частот и построена зависимость частоты от уровня сигнала, который представлен на рисунке 2.1.

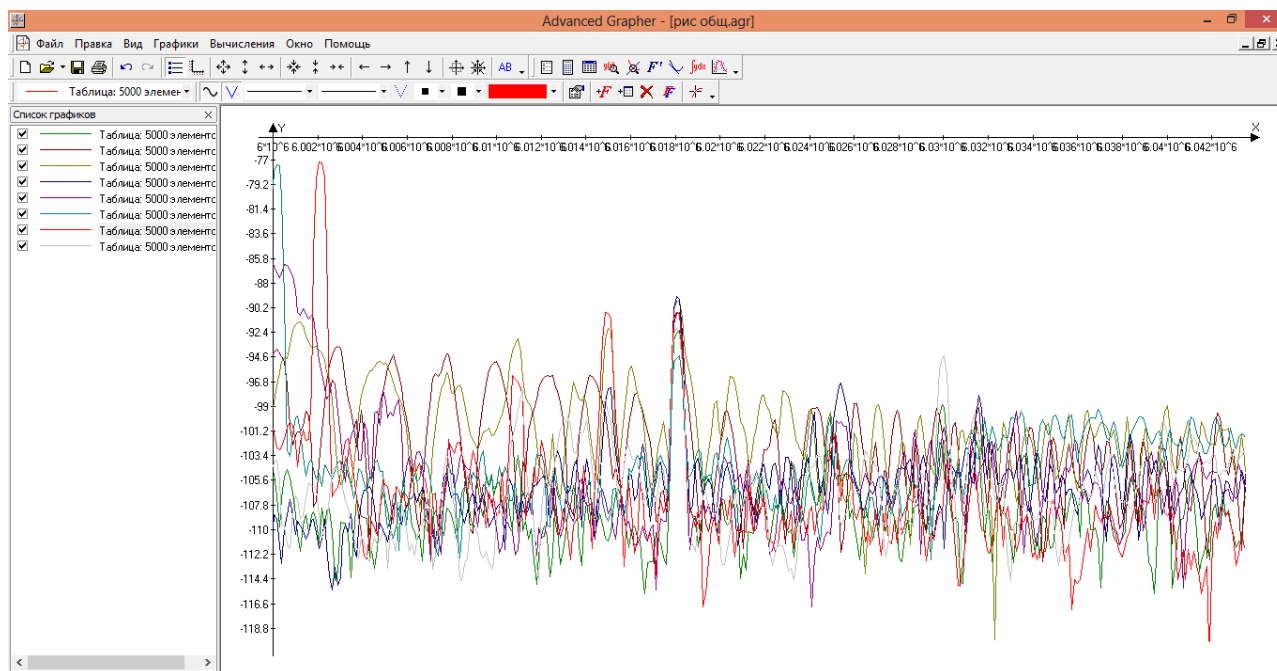


Рисунок 2.1 – Спектрограмма с диапазоном частот 5,95 – 11 МГц

На рисунке 2.2 представлены 8 графиков разных цветов, соответствующие времени 0 часов, 3 часа, 6 часов, 9 часов, 12 часов, 15 часов, 18 часов и 21 час, на котором определена оптимальная частота радиостанции.

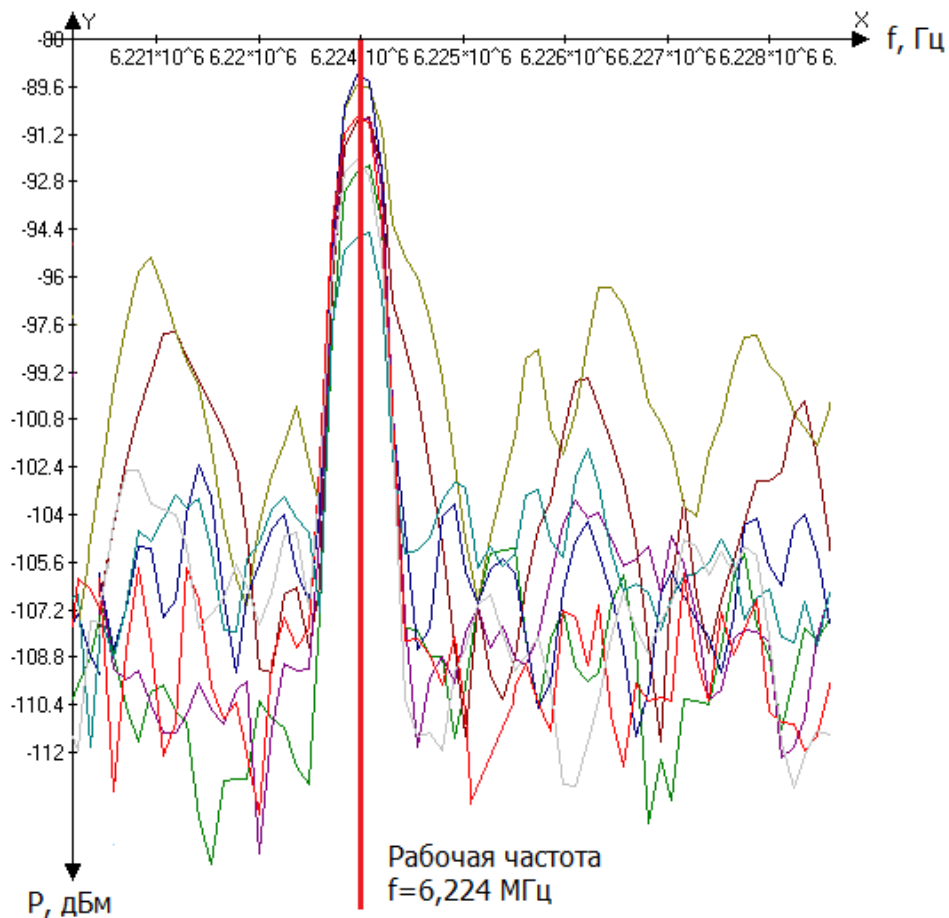


Рисунок 2.2 – Выбор рабочей частоты

Из рисунка 2.2 следует, что выбранная рабочая частота соответствует частоте, на которой радиостанция работает круглосуточно.

Эффект воздействия плазмы ионосферы на распространяющуюся в ней радиоволну определяется, в основном, взаимодействием электрического поля волны со свободными электронами. Повторяя хорошо известные выкладки, рассмотрим движение электрона в электрическом поле падающей волны в простейшем случае без учета магнитного поля:

$$m_e \ddot{r} = -eE, \quad (2.12)$$

С учетом выражения для тока

$$-eN \dot{r} = \sigma E, \quad (2.13)$$

и уравнений Максвелла получаем для монохроматической волны:

$$n^2 = 1 + \frac{4\pi i}{\omega} \sigma = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}, \quad (2.14)$$

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} n^2, \quad (2.15)$$

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{4\pi N e^2}{m_e}}, \quad (2.16)$$

$$f_{pe}(\text{МГц}) = 8,98 \cdot 10^{-3} \sqrt{N(\text{см}^{-3})}, \quad (2.17)$$

Здесь  $n$  — коэффициент преломления,

$m_e$  — масса электрона,

$e$  — элементарный заряд,

$E \sim \exp\{ikz - i\omega t\}$  — напряженность электрического поля волны,

$N$  — электронная концентрация,

$\sigma$  — проводимость,

$r$  — радиус-вектор электрона,

$\omega_{pe}$ ,  $f_{pe}$  — собственная частота колебания электронов в плазме, называемая плазменной частотой,

$\omega = 2\pi f$  и  $k$  — частота и длина волны.

Величина коэффициента преломления определяет закон распространения волны. Волны с частотой ниже  $f_{pe}$  не могут распространяться в плазме (коэффициент преломления становится комплексным) и отражаются от ее границы. В реальной ионосфере концентрация электронов растет с высотой и достигает максимума в слое F2.

Таким образом, в приближении геометрической оптики (при условии, что длина волны много меньше размера ионосферы) при вертикальном распространении радиоволны отражение происходит на высоте,

$$\text{где } n = 0, \text{ т. е.}, \quad (2.18)$$

$$\text{где } f_{pe}(h) = f,$$

Если частота волны выше плазменной частоты максимума концентрации электронов, то отражения не происходит, волна проникает сквозь ионосферу и практически свободно распространяется в космическом пространстве (так как концентрация плазмы в магнитосфере на порядки величин ниже ионосферной).

Наибольшая частота отражения вертикальной волны называется критической частотой и обозначается  $foF2$ . Она может достигать 20 МГц в горбах экваториальной аномалии в максимуме слоя F2 ионосферы днем и в периоды максимумов солнечной активности. В умеренных широтах  $foF2$  составляет несколько мегагерц. На практике в единицах плазменной частоты

(соответствующей максимальной или характерной концентрации электронов) часто выражают параметры различных слоев ионосферы. Высота, на которой происходит отражение на критической частоте, называется высотой главного максимума и обозначается  $h_m F 2$ .

При наличии магнитного поля  $H$  радиоволна разделяется на эллиптически поляризованные обыкновенную и необыкновенную волны, параметры которых зависят от величины поля и от угла между направлениями распространения волны и вектора поля. Обыкновенной (индекс  $O$ ) называется волна, электрический вектор которой вращается по часовой стрелке, если наблюдатель стоит к приближающейся к нему волне. Волна, электрический вектор которой вращается против часовой стрелки, называется необыкновенной (индексы  $X$  и  $Z$ ). Коэффициент преломления обыкновенной волны такой же, как и в случае без магнитного поля, а преломление необыкновенных волн зависит и от величины гирочастоты электронов

$$\omega_{he} = eH/(m_e c), \quad (2.19)$$

Это объясняется тем, что электрический вектор необыкновенной волны вращается в ту же сторону, что и электрон при его движении в геомагнитном поле, что создает возможность обмена энергией между волной и плазмой.

Частоты отсечек (при которых коэффициент преломления обращается в ноль) необыкновенных волн выражаются как

$$\omega_{x,z} = \frac{\sqrt{4\omega_{pe}^2 + \omega_{he}^2}}{2} \pm \frac{\omega_{he}}{2}, \quad (2.20)$$

В высоких широтах гирочастота составляет

$$\omega_{he} \sim 1 \text{ МГц}, \quad (2.21)$$

а на экваторе

$$\omega_{he} \sim 0,5 \text{ МГц}, \quad (2.22)$$

Затухание волны в ионосфере определяется частотой столкновений свободных электронов с нейтральными атомами  $\nu_{en}$ . Простейшее уравнение движения электронов тогда записывается в виде

$$m_e \ddot{r} = -eE - m_e \nu_{en} \dot{r}. \quad (2.23)$$

Введя затухание волны  $\chi$ , как

$$E \sim \exp\{ikz - \chi z - i\omega t\}, \quad (2.24)$$



и предполагая, что  $v_{en} \ll \omega$ , получаем

$$\chi \approx v_{en} \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}, \quad (2.25)$$

$$\chi \approx \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 6,224^2} \frac{1}{243,2}$$

Затухание пропорционально частоте столкновений и плотности плазмы и обратно пропорционально квадрату частоты. В ионосфере максимум поглощения находится в D-слое. Наиболее подвержены затуханию более низкочастотные длинные и средние волны и для уменьшения поглощения необходимо передавать сигнал на максимально возможной частоте. Если затухание невелико, что обычно бывает ночью, когда слой D пропадает, короткие волны, многократно отражаясь от ионосферы и поверхности, способны обогнуть весь земной шар.

Обратной стороной возможности использования ионосферы для дальней радиосвязи является сильное влияние различных солнечно-земных факторов на качество сигнала. Первое представление об условиях распространения коротких волн можно получить, регулярно слушая радиоприемник. При прохождении через ионосферу радиоволна подвергается различным типам воздействия, что приводит к вариациям амплитуды, фазы и частоты сигнала. Потеря необходимого уровня когерентности может привести к потере информации, а потребители специализированных линий дальней связи должны быть уверены в том, что сигнал их достигнет. Некоторые простейшие аспекты расчета распространения радиосигналов представлены ниже.

Так как практически распространение радиосигнала происходит не по вертикали, а вдоль поверхности на наклонных трассах, это расширяет диапазон используемых частот. При наклонном падении волны снизу на слоистую ионосферу происходит рефракция и траектория луча отклоняется обратно к Земле. Максимальная частота, которая еще может таким образом отразиться от ионосферы при заданной высоте отражения  $h$ , называется максимально применимой частотой (МПЧ) (maximum usable frequency MUF), и определяется как

$$MUF(h) = f_{pe}(h) \cdot \sec i, \quad (2.26)$$

где  $f_{pe}(h)$  — плазменная частота на данной высоте,  
 $i$  — угол падения радиоволны на ионосферу.

Даже в предположении идеального отражения, необходимо выбирать частоту передачи с учетом расстояния между приемником и передатчиком, возможности многоскачкового распространения и наличия мертвой зоны (рисунок 2.3, 2.4).

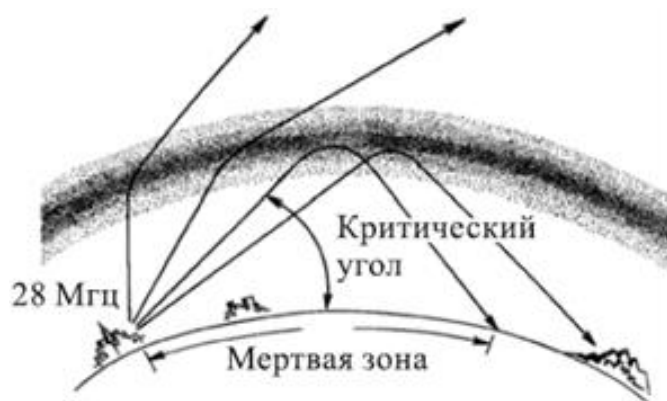


Рисунок 2.3 – Схема возможного распространения коротких радиоволн с частотой 28 МГц



Рисунок 2.4 – Схема возможного распространения коротких радиоволн с частотой 3,5 МГц

На рисунке 2.3 — волна с частотой 28 МГц отражается от ионосферы только при достаточно малом угле падения (обозначен как критический угол) и создает достаточно протяженную мертвую зону, в которой прием невозможен. На рисунке 2.4 — волна с частотой 3,5 МГц отражается от ионосферы в широком диапазоне углов, мертвая зона мала, распространение может быть многоскачковым.

При расчетах необходимо учитывать регулярную широтную и высотную структуру ионосферы вдоль радиотрассы в ее суточной и сезонной динамике. Например, при наличии горизонтальных градиентов электронной концентрации может оказаться, что частоты для передачи сигнала из пункта А в пункт Б и наоборот, из пункта в Б в пункт А, будут различны.

Отсюда следует, что выбранная рабочая частота  $f = 6,224$  МГц является оптимальной и соответствует схеме возможного распространения коротких радиоволн.

## 2.2 Закономерности распространения радиоволн в различных средах

Закономерности распространения радиоволн в различных средах

определяются совместным решением уравнений Максвелла и среды распространения. Последние характеризуются следующими выражениями:

$$\vec{D} = \varepsilon_a \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu_a \vec{H}, \quad \vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{E}_v). \quad (2.27)$$

где  $D$  и  $B$ - электрическая и магнитная индукция,  
 $j$  – плотность тока,  
 $\sigma$  - проводимость.

Выражения (2.27) называются уравнениями состояния среды, в которой происходят электромагнитные процессы. Характеристиками среды являются величины:

$$\begin{aligned} \varepsilon_a &= \varepsilon \varepsilon_0, \\ \mu_a &= \mu \mu_0, \\ &\sigma. \end{aligned} \quad (2.28)$$

где  $\varepsilon$  и  $\mu$ - относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости, а  $\sigma$ - проводимость среды.

Величины  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$  – электрическая и магнитная постоянные - относятся к вакууму или так называемому свободному пространству и имеют значения:

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 &= \frac{10^{-9}}{36\pi} = 8,854 \cdot 10^{-12}, \quad \text{Ф/м} \left( \frac{\text{А} \cdot \text{с}}{\text{В} \cdot \text{м}} \right) \quad \text{и} \\ \mu_0 &= 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,256 \cdot 10^{-6}, \quad \text{Гн/м} \left( \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А} \cdot \text{м}} \right). \end{aligned} \quad (2.29)$$

Для вакуума  $\varepsilon = \mu = 1$ , для любых иных сред  $\varepsilon \neq 1, \mu \neq 1$ .

Диэлектрическая (магнитная) проницаемость – физическая переменная, которая определяет проницаемость среды для электрического (магнитного) поля.

Диэлектрическая проницаемость среды  $\varepsilon$  является не скаляром, а тензором второго порядка, который отражает её физическую структуру и довольно сильно зависит от собственных свойств среды. Эта зависимость частоты известна как дисперсия. Среда по величине проницаемости подразделяются на проводники, полупроводники и изоляторы (диэлектрики). Диэлектрическая проницаемость некоторых веществ (при 18 °С) представлена в таблице 1.

Относительная магнитная проницаемость для большинства материалов (например, для воздуха), равняется единице,  $\mu_a = 1$ .

Материалы с отрицательной относительной магнитной проницаемостью  $\mu_a < 0$  называются диамагнетиками, с положительной относительной магнитной проницаемостью  $\mu_a > 0$  – парамагнетиками и с очень

большой относительной магнитной проницаемостью  $\mu_a \gg 0$  – ферромагнетиками.

Т а б л и ц а 1 – Диэлектрическая проницаемость некоторых веществ (при 18 °С)

Среда	$\varepsilon$
Вакуум	1,0
Воздух	1,00059
Вода	80,1
Стекло	6 ÷ 8
Сухая земля	3,9
Сырая земля	29
Лёд (-20°С)	16

Проницаемость при низких частотах, обычно выражается как числовая величина (диапазон кГц и МГц в зависимости от метода измерения), в которой молекулярные диполи (и атомные орбитальные электроны), могут следовать за внешним полем.

Из уравнения Максвелла выводится соотношение между оптическим показателем преломления, диэлектрической и магнитной проницаемостями

$$n^2 = \varepsilon \cdot \mu, \quad (2.30)$$

Между магнитной  $\mu_0$  и электрической  $\varepsilon_0$  постоянными и скоростью распространения электромагнитной волны в вакууме  $c$ , существует соотношение:

$$\varepsilon_0 \cdot \mu_0 = \frac{1}{c^2}, \quad (2.31)$$

Для магнитоактивных сред даются следующие выражения:

$$\mu_a = \mu_0 \cdot \mu, \quad \mu_a = \frac{B}{H}, \quad (2.32)$$

Общая магнитная проницаемость таких сред -  $\mu_a$  определяется произведением абсолютной  $\mu_0$  и относительной  $\mu$  магнитной проницаемостей.

В общем случае  $\varepsilon$ ,  $\mu$  и  $\sigma$  могут быть функциями времени и координат, особенно это относится к величинам  $\varepsilon$  и  $\sigma$  для реальной земной поверхности и атмосферы, свойства которых неоднородны и непостоянны во времени.

В расчётах параметров радиоволн, распространяющихся в пространстве, задача сводится к решению уравнений Максвелла относительно величин электрической  $\vec{E}$  и магнитной  $\vec{H}$  напряжённости поля.

$$\Delta \vec{E} - \text{grad div} \vec{E} + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon' \vec{E} = 0, \quad (2.33)$$

$$\Delta \vec{H} + \frac{1}{\varepsilon'} [\text{grad} \varepsilon' \cdot \text{rot} \vec{H}] + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon' \vec{H} = 0$$

Совместное решение этих уравнений сводится к их преобразованию в два других уравнения, каждое из которых содержит только одну неизвестную величину.

Так для однородной среды при отсутствии пространственного заряда ( $\rho=0$ ) и сторонних электродвижущих сил ( $\mathbf{E}^{\text{ct}}=0$ ) легко получить:

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0, \quad (2.34)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0, \quad (2.35)$$

где  $k$  называется постоянной распространения среды.

$$k = \sqrt{\omega^2 \varepsilon_0 \mu + i \omega \mu \sigma} = \alpha + i \beta. \quad (2.36)$$

Выражения (2.34-2.36) называются уравнениями Гельмгольца или однородными волновыми уравнениями.

Для безграничной изотропной среды решение уравнений (2.34-2.36) имеет вид плоской волны:

$$\vec{E} = \vec{E}_k e^{-i(\omega t - \vec{k} \vec{r})} \quad \text{и} \quad \vec{H} = \vec{H}_k e^{-i(\omega t - \vec{k} \vec{r})}, \quad (2.37)$$

где  $\vec{k} = \vec{n} k$  - волновой вектор;

$\vec{r}$  - радиус-вектор точки, в которой определяется напряжённость поля;

$\vec{n}$  - единичный вектор нормали к эквивалентной поверхности  $(kr) = \text{const}$ .

Для любых параметров проводящей среды система уравнений искомых полей  $E(z)$ ,  $H(z)$ , после исключения компонент  $E_z, H_z$ , преобразуется к виду

$$\frac{d\vec{\Pi}}{dz} = -i k_0 \mathbf{C} \vec{\Pi}, \quad (2.38)$$

где  $\vec{\Pi}$  - вектор с компонентами  $E_x, E_y, H_x, H_y$ ;

$\mathbf{C}$  - матрица системы с элементами, зависящими от координаты  $z$ , частоты волны  $\omega$  (через компоненты тензора диэлектрической проницаемости) и от параметра  $\rho$ , т.е.

$$\hat{\mathbf{C}} = \hat{\mathbf{C}}(\varepsilon \dot{\gamma}(\omega, z), \rho), \quad (2.39)$$

При решении уравнений электромагнитного поля не всегда возможно

задавать точные характеристики среды распространения (ионизация, проводимость, диэлектрическая проницаемость). Поэтому имеет смысл использовать полные волновые уравнения для случаев, когда необходимо оценить ошибку при использовании более простых приближений.

$$\begin{array}{c}
 \text{O} \quad \text{O} \quad \text{O} \\
 \text{M} \quad \text{P/E}_z \quad \text{P/E}_z \quad \text{P/E}_z \\
 \text{E}_x \text{E}_y \text{E}_z \quad \text{E}_x \text{E}_y \text{E}_z \quad \text{E}_x \text{E}_y \text{E}_z \\
 \text{E}_x \text{E}_y \text{E}_z \quad \text{E}_x \text{E}_y \text{E}_z \quad \text{E}_x \text{E}_y \text{E}_z
 \end{array} \quad (2.40)$$

Также следует отметить, что среда влияет на поглощение, траекторию (отражение, дифракция, преломление) и скорость распространения радиоволн. Магнитное поле Земли в ионизированной плазме приводит к расщеплению радиосигнала на обыкновенную и необыкновенную составляющие, которые имеют специфические дисперсионные характеристики взаимодействия со средой.

Поскольку ионосферная плазма является магнитоактивной, и магнитное поле влияет на распространение радиоволн, приведём некоторые сведения о магнитном поле Земли.

Вернёмся непосредственно к теории распространения радиоволн в магнитоактивной ионосфере. Компоненты матрицы для ионосферной плазмы можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \epsilon_{xx} &= 1 - \frac{v}{(1-i)u}, & \epsilon_{yy} &= 1 - \frac{v \sqrt{(1-i)^2 - u^2}}{(1-i)[(1-i)^2 - u^2]} \\
 \epsilon_{zz} &= 1 - \frac{v \sqrt{(1-i)^2 - u^2 \cos^2 \alpha}}{(1-i)[(1-i)^2 - u^2]}, & \epsilon_{xz} = \epsilon_{zx} &= \frac{i u \sin \alpha}{(1-i)^2 - u^2} \\
 \epsilon_{xy} = \epsilon_{yx} &= \frac{i v \cos \alpha}{(1-i)^2 - u^2}, & \epsilon_{yz} = \epsilon_{zy} &= \frac{u \cos \alpha \sin \alpha}{(1-i)[(1-i)^2 - u^2]}
 \end{aligned} \quad (2.41)$$

где  $\omega$  - круговая частота радиоволны;

$\sqrt{u} = \frac{\omega_H}{\omega}$  - коэффициент влияния магнитного поля Земли,

$\omega_H = 8,8$  МГц – круговая гирочастота электронов – угловая частота вращения электрона вокруг силовой линии магнитного поля Земли;

$v = \frac{4\pi N_e \cdot 10^{-18}}{\omega m \omega_0}$  - функция воздействия электронной

концентрации,

$e, m$  – заряд и масса электрона;

$N_e$  - электронная концентрация,

$\omega_0$  – плазменная частота ионосферы;

$s=v/\omega$ - функция воздействия частоты соударений,  
 $v$  - частота соударений электронов с нейтральными атомами,  
 $\alpha$  - угол между векторами магнитного поля и направлением распространения радиоволны.

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

Вариации характеристик сигнала в ионосфере определяются комплексной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon'$ , связанной с показателем преломления  $n$  и поглощения  $\alpha$  следующим выражением:

$$\epsilon' = (n-i\alpha)^2 = (n^2 - \alpha^2) - i2n\alpha. \quad (2.42)$$

При этом выражение для комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  принимает вид:

$$\epsilon' = 1 - \frac{v(1-is - \alpha)}{(1-is)^2 - u - (1-is)v}, \quad (2.43)$$

где знак «+» перед корнем в знаменателе выражения (2.43) даёт решение для обыкновенной, а знак «-» - для необыкновенной компонент радиосигнала.

Выражение (2.43) можно значительно упростить, если рабочая частота  $f$  значительно превышает частоту соударений  $\nu$ , и если направление распространения радиоволны происходит вдоль или поперек вектора магнитного поля Земли.

Для поперечного распространения радиоволны  $\alpha=\pi/2$  уравнение (2.43) принимает вид:

а) для обыкновенной компоненты

$$\epsilon' = (n-i\alpha)_{o}^2 = 1 - \frac{v(1-is - v)}{(1-is)^2 - u - (1-is)v}, \quad (2.44)$$

б) для необыкновенной компоненты

$$\epsilon' = (n-i\alpha)_{n}^2 = 1 - \frac{v}{1-is}. \quad (2.45)$$

Для продольного распространения  $\alpha=0$  уравнение (2.43) принимает вид

$$(n-i\alpha)_{n, o}^2 = 1 - \frac{v}{1-is \pm \sqrt{u}}. \quad (2.46)$$

### 3 Экспериментальная часть

#### 3.1 Данные Dst - индекса по геомагнитной бури

В данной работе для числовой характеристики магнитной бури для КВ частоты использовался геомагнитный индекс  $D_{st}$ .

$D_{st}$  – вариации являются мерой интенсивности кольцевых токов, протекающих на расстояниях от 2 до 7 земных радиусов. На земной поверхности влияние этих кольцевых токов сказывается в уменьшении  $H$ -составляющей магнитного поля с максимальным уменьшением в низких широтах. Вычисляется  $D_{st}$ -индекс как усреднённая величина амплитуды возмущения в единицах Тесла, отсчитываемая от спокойного уровня.

Усреднение производится по данным низкоширотных станций, равномерно распределённых по долготе. Эта операция автоматически исключает долготные различия. Таким образом,  $D_{st}$ -индекс характеризует усреднённую величину возмущения.

Классификация бурь по  $D_{st}$  была предложена Левом и Пролстом [21, 22]:  
слабые от -30 до -50 нТ,  
умеренные от -50 до -100 нТ,  
сильные от -100 до -200 нТ,  
очень сильные от -200 до -350 нТ,  
экстремальные выше -350 нТ.

В эксперименте были использованы данные по геомагнитной обстановке Мирового центра данных в Киото, Япония. Период испытаний – с 1 по 14 сентября 2014 года. На рисунке 3.1, 3.2 представлены данные  $D_{st}$  индексов за указанный период [23].



Рисунок 3.1 – Ежечасная статистика Dst индекса с 1 по 14 сентября 2014 года



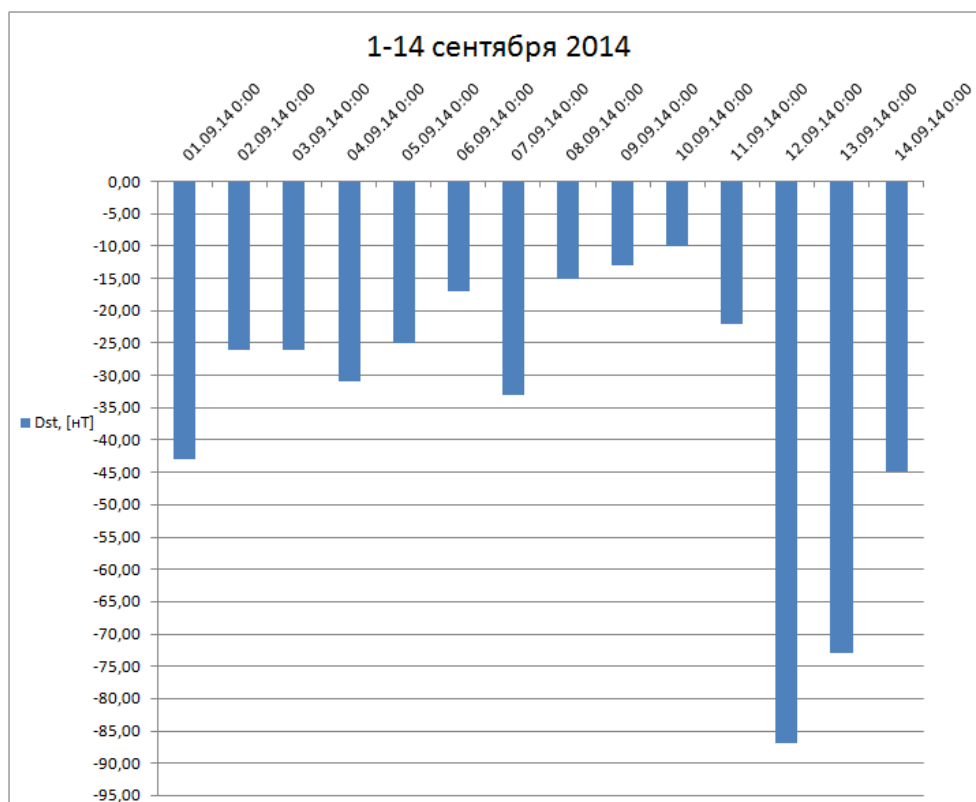


Рисунок 3.2 – Ежедневная статистика  $D_{st}$  индекса с 1 по 14 сентября 2014 года

Из рисунков 3.1, 3.2 видно, что в данном периоде наблюдались явно отличимые возмущения  $D_{st}$ -индекса, относящиеся к 1, 4, 7 и 12-14 сентября. Возмущение 12-14 сентября приближается к уровню «умеренного», остальные относятся к «слабым» возмущениям магнитного поля Земли.

### 3.2 Описание экспериментальной установки

В качестве экспериментальной установки был выбран многоканальный анализатор спектра «БАРС», который был установлен в НИЦ «Гранит» г.Алматы. Изделие выполнено в виде переносного моноблока, объединяющего в одном корпусе модули анализаторов спектра, а также ноутбук. Многоканальный анализатор спектра «БАРС» предназначен для измерения характеристик радиосигналов [24]. Анализатор стал работать с начала 2014 года. За весь период измерений вплоть до 2-ой декады 2014 г. существенных возмущений магнитного поля Земли не наблюдалось. Этим и определился выбранный для анализа период 1-14 сентября.

#### 3.2.1 Назначение изделия

Многоканальный анализатор спектра «БАРС» - далее по тексту Изделие, предназначен для измерения характеристик радиосигналов. Может

использоваться для мониторинга спектра, лабораторных испытаний и научных исследований.

Изделие - конструктивно законченное устройство, выполненное в корпусе кейса.

### 3.2.2 Технические характеристики

Технические характеристики изделия во многом зависят от его конфигурации и версии программного обеспечения. В таблице приведены минимальные и максимальные (в скобках) значения.

Т а б л и ц а 3.1 - Технические характеристики изделия

Технические характеристики изделия	Значения
Диапазон частот	1 Гц – 4.4 (12.4) ГГц
Динамический диапазон	-151 - +10 дБм
Разрешение по частоте (RBW)	0.1 Гц - 250 кГц
Точность измерения уровней	0.25 дБ
Полоса частот I/Q демодулятора	240 кГц
Скорость сканирования	140 МГц/с
Количество каналов	2 (5)
Наличие GPS	нет (есть)
Диапазон рабочих температур, градусов Цельсия	+5...+40
Электропитание: от сети	200...240 В/ 50 Гц
Время непрерывной работы изделия от сети 220 В	не ограничено
Размеры корпуса изделия, мм	455×345×150
Вес изделия, кг	не более 10

Состав изделия:

- многоканальный анализатор спектра «БАРС»;
- адаптер питания (далее - адаптер) - 2 шт;
- приёмник GPS (опционально).

Устройство и работа. Конструктивное Изделие выполнено в виде переносного моноблока, объединяющего в одном корпусе модули анализаторов спектра, а также ноутбук. Внешний вид Изделия показан на рисунке 3.2.

Электропитание. Изделия осуществляется от сети переменного тока 220 В, 50 Гц через блоки питания (адаптеры). Адаптеры питания предназначены для преобразования напряжения 220 В/50 Гц в постоянное напряжение +5 В (для работы модулей анализаторов спектра) и +18 В (для работы ноутбука).

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



Рисунок 3.3 - Внешний вид Изделия

Многоканальный анализатор спектра «БАРС» работает в следующих режимах:

- одноканальном;
- многоканальном.

В одноканальном режиме используется только первый канал и программное обеспечение, поставляемое изготовителем изделия SA44B. Оно позволяет производить измерение спектров и демодуляцию радиосигналов. Одноканальный режим предназначен для поиска радиосигналов и оценки их характеристик.

В многоканальном режиме изделие может снимать спектрограммы заданных оператором участков спектра периодически, через интервалы времени, которые можно задавать с точностью до 1 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.

### 3.2.3 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 (СДВ-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 – 1000 кГц 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.

Проводится определение источников излучения через Интернет и литературных источников и их местоположения.

### 3.3 Результаты наблюдений и их анализ

В эксперименте были использованы данные канала, производившего измерения в диапазоне 1,0 – 10,0 МГц с полосой 3,0 кГц. Для анализа реакции КВ-сигнала выбран сигнал радиостанции, круглосуточно работающей на частоте 6,224 МГц.

На рисунке 3.4 представлены изменения мощности принимаемого в Алматы радиосигнала в ночные часы суток.

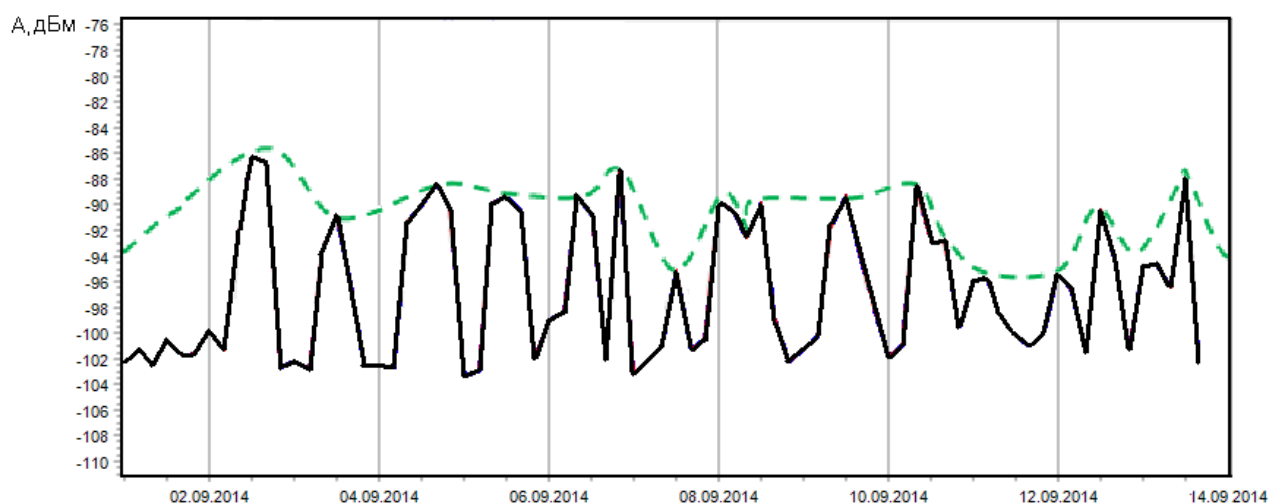


Рисунок 3.4 – Вариации мощности сигнала на частоте 6 МГц

На нём сплошной линией представлены сглаженные часовые значения изменений мощности в дБм относительно 1 Вт. Прерывистой линией обозначены изменения мощности сигнала в полночные часы суток.

На рисунке 3.5 представлен суточный ход исследуемого сигнала, который приблизительно равен -92дБм.

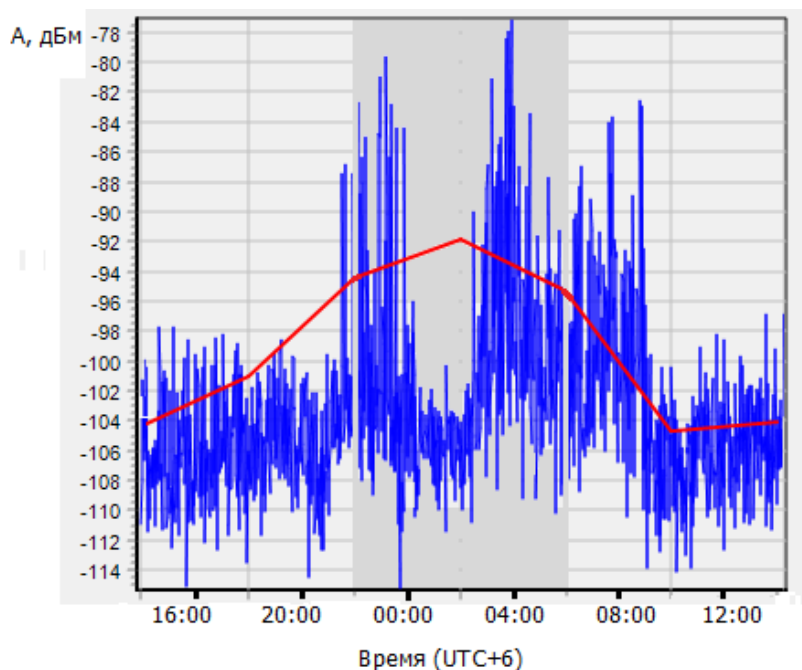


Рисунок 3.5 – Среднесуточный ход мощности сигнала

Из рисунков 3.4, 3.5 следует, что амплитуда сигнала в полночные часы суток наибольшая, а влияние иных источников возмущений наименьшее.

Двухнедельный период 1 - 14 сентября 2014 года характеризуется магнитной бурей представленной на рисунке 3.6.

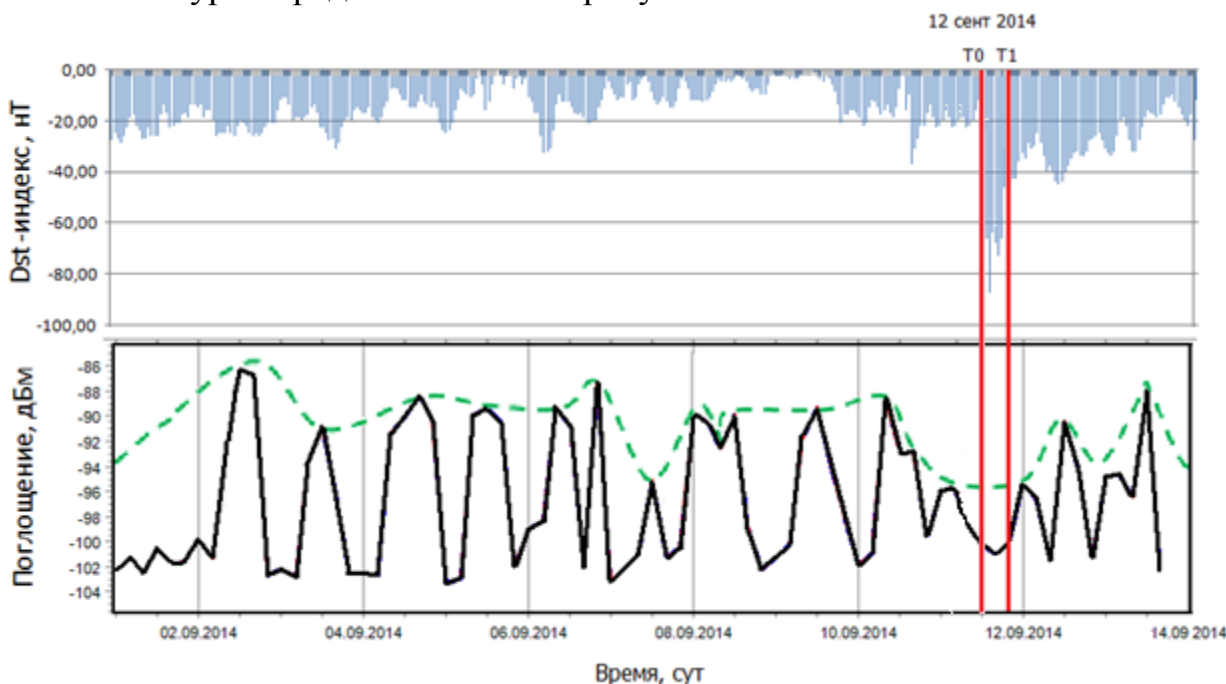


Рисунок 3.6 – Верхняя панель (а) вариации Dst-индекса, панель (б) поведение мощности сигнала.

Верхняя панель (а) иллюстрирует вариации Dst-индекса, а панель (б) демонстрирует поведение мощности сигнала. Согласно классификации, приведенных в работах [21, 22], данная буря относится к классу умеренных. Для подобных бурь необходимо выполнение условий: минимум Dst должен быть  $Dst < -50$  нТ в течение времени не менее двух часов,  $AT > 2$  ч. Из рисунков 3.1, 3.2 следует, что данные условия практически выполняются.

Вариации Dst-индекса, панель (а), указывают на то, что магнитная буря продолжительностью 4 ч, имеет начало  $T_0$  в 00:00 12 сентября и конец обозначен  $T_1$  в 04:00 12 сентября. Эта буря выделена двумя вертикальными линиями на рисунке 3.6.

Согласно рисунку 3.7 рассматриваемая магнитная буря имеет максимум своего развития преимущественно в ночных условиях. Ее началом по Dst-индексу приблизительно можно считать 00:00 12 сентября, а окончанием 04:00UT 12 сентября.

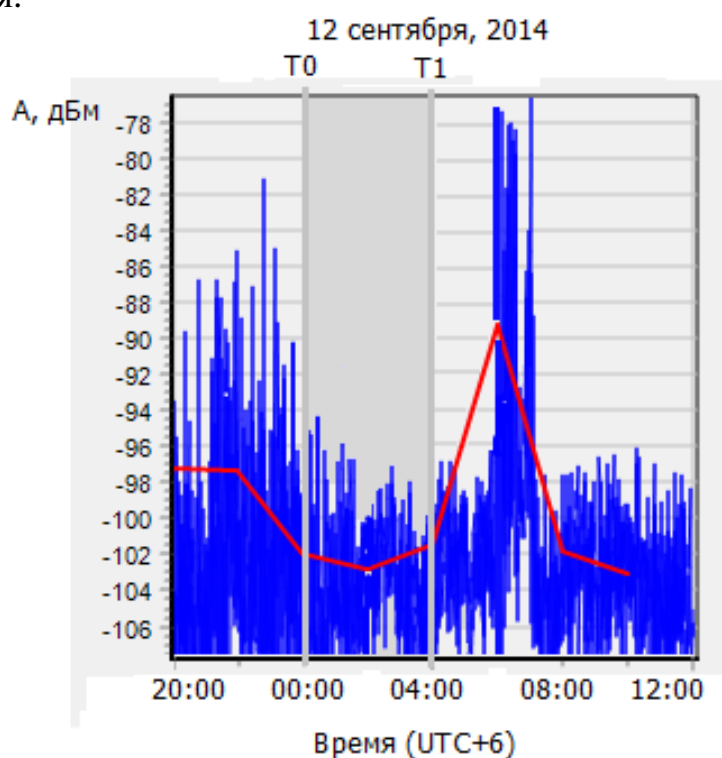


Рисунок 3.7 – Поведение мощности сигнала в период магнитной бури

Как видно из рисунка 3.6 панель (б), в дни возмущений магнитного поля 12 сентября мощность сигнала существенно уменьшается. В ночь на 11 сентября произошла мощнейшая вспышка на Солнце, которая повлекла за собой магнитную бурю 12 сентября панель (а). Что привело к полному поглощению энергии радиоволны и может быть приравнено к эффекту Делинджера [25, 26].

Отдельно необходимо отметить, что эффект Делинджера или явления полного поглощения радиоволн (black-out), возникают из-за интенсификации D-слоя после солнечных эруптивных событий [17]. Так называемое внезапное ионосферное возмущение (sudden ionospheric disturbance), которое блокирует

радиосвязь на 1–3 ч. Оно происходит из-за резкого увеличения концентрации свободных электронов под воздействием рентгеновского излучения мощной солнечной вспышки.

Распространение через такую среду приводит к сильной деградации сигнала: потери когерентности отражения, увеличению поглощения, дифракции и рассеяния.

## Заключение

В современном мире необходимость рассмотрения эффектов космической погоды является особенно насущной, так как жизнь человека и общества критически зависит от технических средств, а учет долговременных изменений среды обитания становится необходимым элементом планирования. С течением времени актуальность этой проблематики будет возрастать в связи с бурным развитием телекоммуникационных систем.

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. Приводятся основные понятия и классификация геомагнитных бурь. Даны характеристики околоземных и атмосферных сред и их влияния на распространение радиоволн исследуемого КВ – диапазона. Кратко описана траектория распространения радиоволн в ионосфере.

В работе произведен расчет рабочей частоты, зависимость затухания радиосигнала в ионосфере.

На тему магистерской диссертации была написана научная статья, опубликованная в научном журнале университета АУЭС имеющая название «Вестник АУЭС».

В ходе работы был проведен эксперимент с помощью многоканального анализатора "БАРС".

На основе поставленного эксперимента сформулирован вывод, что ночные уровни КВ-сигналов в периоды возмущений магнитного поля Земли всегда в пункте приёма уменьшают свою мощность. Прямая пропорциональная зависимость между амплитудой сигнала и степенью возмущения магнитного поля Земли не наблюдается.



## Список литературы

- 1 Yermolaev, Y. I., et al. (2005), A year later: Solar, heliospheric, and magnetospheric disturbances in November 2004 (in Russian), *Geomagn. Aeron.*, 45(6), 723 – 763. (*Geomagn. Aeron., Engl. Transl.*, 45(6), 681 –719.)
- 2 Veselovsky, I. S., et al. (2004), Solar and heliospheric phenomena in October November 2003: Causes and effects (in Russian), *Kosm. Issled.*, 42(5), 453 – 508. (*Cosmic Res., Engl. Transl.*, 42(5), 435 – 488.)
- 3 <http://sec.noaa.gov/NOAAAscales>
- 4 Tsurutani, BT, E. Echer, И. Рихтер, К. Koenders, К.-Х. Glassmeier, хлопают в комета 19P / Боррелли: наблюдения DS1, плана. *Space Sci.*, doi.org/10.1016/j.pss.2012.11.002, 2012.
- 5 Yu.I. Yermolaev, M.Yu. Yermolaev, I.G. Lodkina, N.S. Nikolaeva, 2007, published in *Kosmicheskie Issledovaniya*, 2007, Vol. 45, No. 1, pp. 3–11.
- 6 <http://www.kosmofizika.ru/spravka/coordinates.html>
- 7 Дорман Л.И., Мирошниченко Л.И. *Solar cosmic rays*, Moscow, Nauka (Fizmatgiz), English Edition for NASA by Indian national Scientific Documentation Center, Delhi, 1968
- 8 <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr>
- 9 Dungey I W. Interplanetary magnetic field and the auroral zones. *Phys. Rev. Lett.* 6:47-8, 1961
- 10 Гонсалес Дельгадо, RM, Leitherer, C., и Heckman, TM: 1999, *ApJS* 125 , 489
- 11 Иванов-Холодный Г.С., Никольский Г.М. *Солнце и ионосфера*. М.: Наука, 1969. 455 с
- 12 HEELIS и ICF Мулер-Водарг, *Анналов Geophysicae*, 22 (2), 441, 2004.
13. Хундхаузен А. *Расширение короны и солнечный ветер*. - М.: Мир, 1976. - 302 с.
- 14 *Атмосфера. Справочник*. - Л.: Гидрометеиздат, 1991. - 510 с.
- 15 Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. *Физика ионосферы*.- М.: Наука, 1988. - 528 с.
- 16 Вернов С.Н., Мельников В.В., Савенко И.А. и др. *Исследование заряженных частиц малых энергий на спутниках «Космос-12», «Космос-15» и «Электрон-2» // Известия АН СССР. Серия физическая. – 1965. - № 10. - С. 79 194-199.*
- 17 Митра А. *Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли*. -М.: Мир, 1977. - 370 с.
- 18 Гинзбург В.Л. *Распространение электромагнитных волн в плазме*. М.: Наука, 1967, 684 с.
- 19 Козин И.Д., Федупина И.Н. *Распространение радиоволн: учебное пособие*. – Алматы: НАО АУЭС, 2014. – 80 с.
- 20 Козин И.Д., Федупина И.Н. *Космическая погода и ее влияние на распространение радиоволн: Учебное пособие* - Алматы: НАО АУЭС. 2012, - 79 с.

- 21 <http://ria.ru/documents/20091030/191289322.html#ixzz3G1Er4xW2>
- 22 <http://cedar.openmadrigoal.org/cgi-bin/madCalculator>
- 23 Сайт [<http://madrigoal.haystack.mit.edu/madrigoal/>]
- 24 Промежуточный отчёт АЭУС по теме «Исследование воздействия космической погоды на распространение радиоволн» № госрегистрации 0112РК02388, 2013 год.
- 25 Goodman J.M. HF Communications: Science & Technology, Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.
- 26 ITU-R The Ionosphere and its Effects on Radiowave Propagation (Handbook), a Guide with Background to ITU-R Procedures for Radio Planners and Users, Radiocommunication Bureau, ITU, Geneva, 1998.

# Приложение А

## Окно программы Bars\_analys

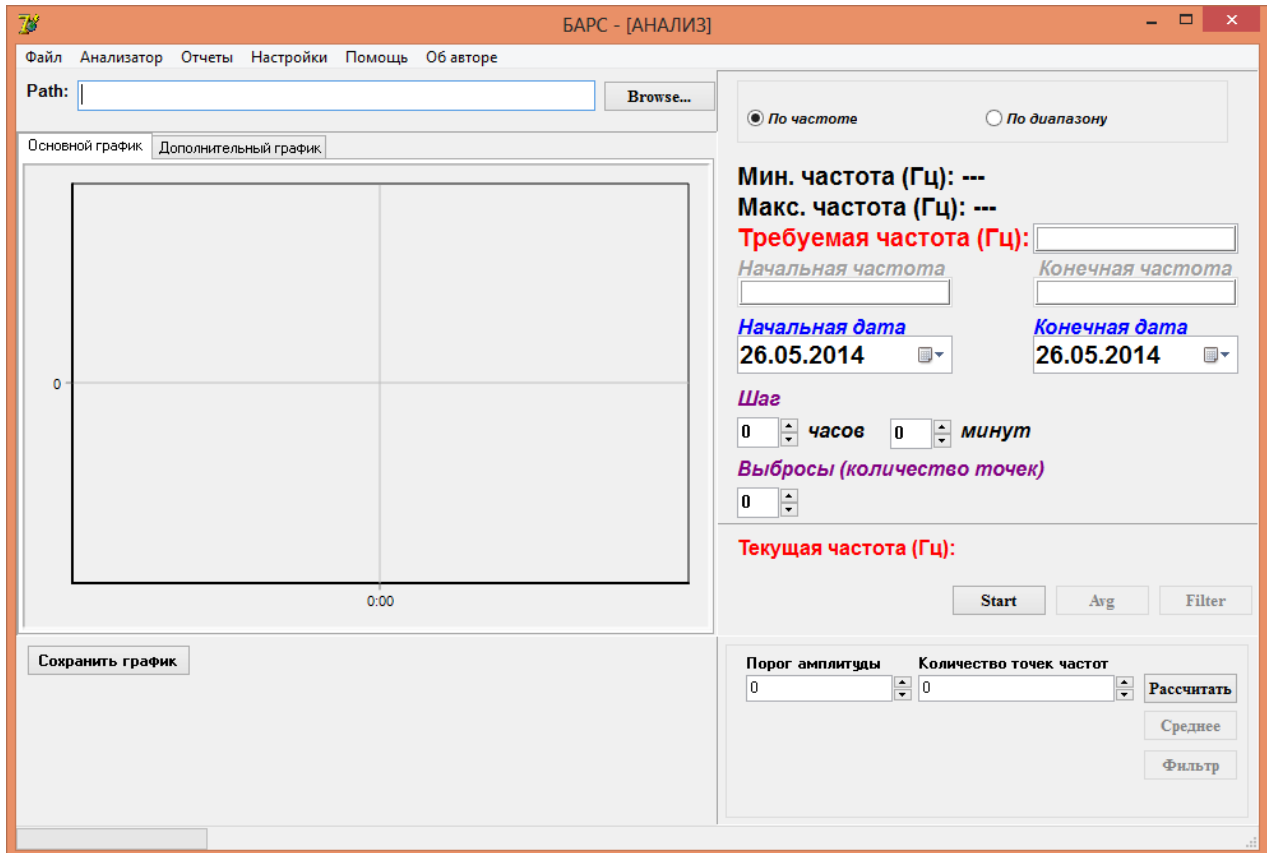


Рисунок А.1 – Окно программы Bars\_analys