

VI ежегодная научная конференция школьников Иркутской области  
"Человек и космос"

**МЕХАНИЗМЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
ИОНОСФЕРНЫХ РАДИОВОЛН НА СВЕРХДАЛЬНИЕ  
РАССТОЯНИЯ С НИЗКИМ ЗАТУХАНИЕМ**

Исследовательская работа

Выполнил:

Теренин Сергей Юрьевич  
Физико-математическое отделение,  
11 класс, МБОУ ШР «Шелеховский лицей»

Научный руководитель:

В.И. Сажин,  
зав. кафедрой ИГУ

г. Шелехов – 2016 г.

## Введение

Ионосферная радиосвязь является экономически выгодным видом передачи информации на дальние расстояния. В то же время ионосфера довольно изменчивая среда и её поведение требует дальнейшего исследования. Оказывается, что в некоторых условиях можно ожидать увеличения дальности ионосферной связи до 10000 км и более, вплоть до обхода радиоволны земного шара. Описанию такой возможности и посвящается данная работа.

**Актуальность** данной работы обусловлена поиском экономически выгодных способов передачи информации на сверхдальние расстояния, который сейчас находится в сфере пристального внимания современной науки.

**Новизна** данной работы заключается в том, что в ней впервые ставится задача оценки затухания сигнала при ионосферном распространении радиоволн на сверхдальние расстояния на основе аппарата школьной физики и математики.

**Объектом** нашего исследования являются ионосферные радиоволны, их особенности и распространение, а **предметом** – механизмы распространения радиоволн на дальние расстояния с низким затуханием.

**Гипотеза:** хордовый и волноводный механизмы ионосферного распространения обеспечивают низкое затухание.

**Цель** нашей работы – рассмотреть механизмы распространения радиоволн на дальние расстояния и выявить такие из них, которые обладают низкими потерями энергии. Цель определяется достижением следующих **задач**:

- рассмотреть особенности ионосферы и ее влияние на распространение радиоволн;
- рассмотреть виды механизмов распространения радиоволн на дальние расстояния и выявить особенности их функционирования;
- проанализировать причины потерь энергии;
- выявить механизмы распространения радиоволн на дальние расстояния с низкими потерями энергии.

Поставленная цель и выдвинутые задачи определили использование следующих **методов исследования**: анализ научной литературы, выбор требуемого материала, выявление причин потерь энергии, оценка различных механизмов распространения.

**Практическая значимость работы.** Материалы исследования могут быть использованы на занятиях по физике в старших классах, на факультативах и консультациях, а также могут послужить основой для проведения дальнейшей исследовательской работы.

## 1. Ионосфера и её изменения [1]

В области, протягивающейся на высоту примерно от 50 км до более чем 500 км, некоторые молекулы ионосферы ионизируются солнечной радиацией, вследствие чего они производят атмосферный газ. Данная область называется ионосферой.

В течение дня могут существовать 4 области, называемые D, E, F1 и F2. Они находятся на примерно таких высотах:

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

В течение дневного времени, спорадический слой E (непостоянный) иногда можно наблюдать в области E, и в определенное время солнечного цикла область F1 не разделена с областью F2, а объединены в общую область F. В ночное время области D, E и F1 становятся очень бедными на свободные электроны, и только область F2 остаётся возможной для связи, хотя спорадический E-слой довольно редко встречается ночью.

Только слои E, F1, спорадический слой E (если присутствует) и область F2 преломляют высокочастотные волны. Область D также важна, хотя и не преломляет ВЧ радиоволны, а поглощает и ослабляет их.

F2 является самой важной областью в распространении высокочастотных радиоволн так как:

- она присутствует в течение 24 суток в день;
- высокое расположение обеспечивает максимальную дальность связи
- она чаще всего отражает самые высокие частоты в высокочастотном диапазоне.

Одна из самых важных характеристик ионосферы с точки зрения радио связи, это её способность преломлять радио волны. Хотя они преломляются только в пределах определенного частотного диапазона. Частотный диапазон зависит отряда факторов. Было применено несколько методов исследования ионосферы и наиболее часто используемым инструментом для этих целей является ионозонд.

Существование электронов самое продолжительное в области F2, что и является одной из причин появления этой области в ночное время. Обычное время существования электронов в областях E, F1 и F2 около 20 секунд, 1 минуты и 20 минут соответственно.

Солнечная радиация является причиной ионизации в ионосфере. Электроны возникают при её столкновении с незаряженными атомами и молекулами. Так как этот процесс требует солнечной радиации, возникновение электронов происходит только в

*Теренин С. Механизмы распространения ионосферных радиоволн...* 3

солнечной части полусферы ионосферы. Когда свободный электрон связывается с заряженным ионом, обычно формируется нейтрально заряженная частица. По существу, исчезновение является процессом, противоположным возникновению. Возникновение и исчезновение - это постоянный процесс, который происходит как днем, так и ночью.

Ионосфера не является стабильным средством передачи одной и той же частоты в течении года или даже суток. Ионосфера изменяется в зависимости от солнечного цикла, сезона. Таким образом, частота, которая успешно распространяется в данный момент, через какой-то час может быть утеряна, в чем и заключается проблема использования ионосферы, как стабильного средства передачи информации.

## **2. Явления при распространении радиоволн**

Согласно общепринятым теориям сверхдальнее распространение коротких радиоволн происходит вследствие их многократного отражения от ионосферы и поверхности Земли. Однако в низкочастотных диапазонах из-за интенсивного поглощения радиоволн в нижней ионосфере (слои *D* и *E*) такое отражение должно сопровождаться слишком большими энергетическими потерями. Также вследствие рефракции — изменения направления радиоволн, теряется часть энергии. Поэтому в этих диапазонах при малых мощностях любительских радиостанций проводить сверхдальние связи, как правило, не удастся.

Возможно также и аномальное распространение радиоволн без промежуточных отражений от поверхности Земли[3], как бы внутри ионосферного волновода. Однако в литературе нет указаний на условия, при которых оно возникает, что исключает возможность прогнозирования таких радиосвязей.

При проведении любительских связей из Алма-Аты в 1965—1976 гг [7]. было замечено, что распространение радиоволн, по-видимому, без промежуточных отражений наблюдается во всех КВ диапазонах для некоторых направлений в одни и те же, постоянные для каждого направления на протяжении всего периода испытаний, интервалы времени. Использование на практике установленных закономерностей дало возможность провести только на 7 и 3,5 МГц более 2 тыс. сверхдальних радиосвязей. Опыты проводились в течение полного 11- летнего цикла активности солнца.

## **3. Скачковый механизм дальнего распространения радиоволн**

Скачковый механизм распространения КВ иллюстрирует рисунок 4, на котором изображены рассчитанные на ЭВМ траектории лучей, излученные из точки ТХ на Земле

*Теренин С. Механизмы распространения ионосферных радиоволн...*

на частоте 12 МГц; слой F — дневной. Вертикальный профиль коэффициента преломления в нем показан на рисунке 3, слева. Частота  $f_{kr}$  меньше частоты  $f$ , поэтому крутые лучи уходят в космос. Однако лучи испытывают рефракцию — постепенное изменение направления, что приводит к возвращению части лучей (не слишком сильно идущих вверх!) на Землю, где они отражаются и опять уходят вверх. Совершая таким образом скачки, лучи продвигаются от TX к точке приема RX примерно по дуге большого круга, соединяющей точки TX и RX. Возможны два пути: короткий и длинный. На каждом из них сигнал КВ может приходиться по нескольким траекториям с различным числом скачков, т.е. разными «модами». Таким образом, КВ распространяются в волноводе, где роль нижней стенки играет Земля, а верхней — слой F (иногда E)[2].

Интенсивность пучка лучей ослабляется по мере удаления от TX из-за его расхождения, потерь и рассеяния при отражениях от Земли и слоя F и при прохождении слоев D и E. Ослабление особенно велико на дневных трассах, где существует слой D. Оно растет с уменьшением частоты. Существует наименьшая применимая частота (НПЧ).

#### 4. Хордовый механизм

Бывает, что дальняя КВ связь осуществляется на частотах выше МЧКЛ или ниже НПЧ, что необъяснимо скачковым механизмом. Так, например, кругосветное КВ эхо (оно было открыто Роббом в 1925 г. и впервые подробно изучено Квэком и Мегелем в 1926 г.) обычно наблюдается на частотах выше МЧКЛ на ночной стороне Земли[3]. Для его объяснения были введены лучи, многократно рефрагирующие на вогнутых слоях ионосферы без промежуточных отражений от Земли, как показано на рис.3 (TX1—RX1), где рефракция лучей заменена отражением от условной поверхности S.

При частоте выше МЧКЛ существует еще одна замечательная поверхность  $S_0$ . Лучи, пересекающие ее, падают слишком круто на ионосферу и уходят в космос. Таким образом, между  $S_0$  и S образуется своеобразный волноводный канал [3] шириной  $d$ . На частоте МЧКЛ его нижняя граница совпадает с поверхностью Земли. С ростом частоты поверхность  $S_0$  поднимается и при некоторой максимальной частоте (обычно в диапазоне УКВ) сливается с верхней границей канала, т.е. канал исчезает. Такой канал нетрудно использовать для связи между двумя спутниками, когда связь возможна даже на УКВ. Если распрямить ионосферу, то лучи изогнутся и станут похожими на траектории при рикошетах плоского камешка, брошенного вдоль поверхности воды. Поэтому они названы рикошетирующими. Это явление родственно эффекту «шепчущей галереи», когда шепот человека, стоящего у вогнутой стенки, распространяется вдоль нее, как бы прилипая к ней.

Для излучателя и приемника, находящихся на Земле, возбуждение подионосферного волновода возможно при рассеянии волн на мелкомасштабных неоднородностях (ТХ—RХ<sub>о</sub> на рис. 3) или благодаря горизонтальным наклонам ионосферы вдоль трассы (ТХ—RХ на рис. 3). Такие наклоны существуют в зонах восхода и захода Солнца, в областях экваториальной аномалии и главного провала ионизации, показанных на рис. 3. При кругосветном эхо, по-видимому, этот волновод возбуждается вторым способом. Интересно отметить, что ослабление КВ сигнала, обошедшего Землю первый раз, равно примерно 100 дБ, а вторичные эхо ослабляются всего лишь на 3...5 дБ. Этот факт также говорит в пользу рикошетирующих траекторий, не испытывающих потерь в слоях С, D и E и мало теряющих при отражениях от слоя F при скользких углах падения.

### **5. Распространение в межслоевых ионосферных каналах**

Наиболее благоприятные условия для сверхдального прохождения на КВ возникают, когда трасса связи проходит вблизи терминатора (границы света и тени на поверхности Земли), а точнее — вдоль вечернего сумеречного и утреннего послевосходного поясов. На всем протяжении таких поясов имеется достаточно высокий уровень электронной концентрации с равномерным ее распределением в области ионосферы. Это обуславливает существование вокруг Земли кольцевого канала, который может обеспечивать связь в широком диапазоне частот при относительно небольшом затухании сигнала [6]. Большую часть пути сигнал проходит в межслоевом ( между слоями E и F<sub>2</sub> ) канале, как бы в естественном волноводе. При этом значительно уменьшая потери энергии на поглощение, т.к. сигнал идет выше основного поглощающего слоя D. Также уменьшаются потери при отражении от поверхности земли на рассеяние энергии.

### **6. Расчет количества скачков и углов.**

На данном этапе работы проведена оценка затухания для скачкового механизма. Для примера выбрана трасса длиной 9 т.км. Проведены расчеты затухания сигнала для различных углов выхода. Для скачкового механизма используем следующую приближенную модель, поясняет которую — рис 4. Далее рассчитываем углы выхода на трассе в 9 т.км, реализующие приближенно целое число скачков, для этого последовательно проходим значения угла выхода от 0° с шагом в 1°. Мы получаем следующие данные:

Таблица 1

Угол выхода	Дальность 1 скачка в км.
5°	3255
10°	2543
11°	2426
15°	2031
16°	1947

Таким образом самые подходящие значения для 3 скачков = 5°, для 4 скачков = 11° и для 5 скачков = 16°.

### 7. Расчет затухания сигнала.

Основными причинами затухания сигнала являются поглощение (потери энергии в следствии столкновений колеблющихся электронов с нейтральными частицами) и потери при отражении от земной поверхности. Рассмотрим вначале второй фактор. По оценкам работы [5], количество потерь на одно отражение составляет примерно 0,8. Тогда расчеты потерь в дб определяются по формуле  $G_{дб} = 10 \cdot \lg(1 / G)$ . Теперь оценим потери при поглощении. Коэффициент потерь  $\Gamma$  по данным работы [5] определяется следующей формулой

$$\Gamma = (6 \cdot f_{oe}^2) / (f_p^2 \cdot \cos \Phi) \quad (1)$$

Здесь  $f_{oe}$ - критическая частота нижнего слоя E, равная 3 Мгц,  $f_p$ - рабочая частота, равная 20 Мгц,  $\Phi$  — угол падения на нижнюю границу ионосферы, принятую в расчетах на высоте 80 км. Величина поглощения оценивается, как  $G_{п} = 1/e^{2\Gamma}$ , здесь  $e$  – число Эйлера, равное 2,71828. . . Для определения  $\Phi$  используется следующая формула

$$\Phi = (R_3 \cdot \sin(90+B)) / (R_3 + hE) \quad (2)$$

здесь  $R_3$  радиус земли,  $B$  угол выхода,  $hE$  высота нижнего слоя E равная 80 км. Переводим в дб по формуле  $G_{дб} = 10 \cdot \lg(1 / G)$  так как это затухание для одного скачка необходимо домножить её на количество скачков. Общее затухание определяется как сумма двух величин -  $G_{п}$  и  $G_{от}$ , для примера приведены вычисления затухания при поглощении для угла выхода 5°.

$$\Gamma = (6 \cdot 9) / (400 \cdot \cos(\arccos(6350 \cdot \sin 95^\circ)) / (6350 + 80)) = 0,7776$$

$$2 \cdot 0,7776$$

$$G = 1 / 2,718 = 0,2222$$

$$G = 10 \cdot \lg(1 / 0,2222) = 6,5325$$

п

дб

Подобным образом были проведены расчеты и для других углов, в итоге получены результаты, представленные на следующем рисунке 5. Из него видно, что наименьшее возможное затухание реализуется при низких углах выхода. Поэтому для получения выигрыша в энергии необходимо нацеливать передающие антенны под низкими углами. С другой стороны мы получили количественную оценку величины наименьшего возможного затухания для скачкового механизма. Проведя подобные вычисления для трасс иной протяженности, мы смогли построить таблицу минимального затухания на трассе в зависимости от её длины, она показана на рисунке 6.

### 8. Оценки для хордового механизма.

Далее мы исследовали хордовый механизм распространения радиоволн, конкретный пример которого показан на рисунке 7, где мы взяли трассу протяженностью 21 т.км. Количество хорд найдено из принципа, что оно будет тем же, что и количество скачков на трассе, с учетом того, что 1 полный скачок уходит на вход и выход из волновода. Затем мы взяли [5] формулу для оценки коэффициента затухания при хордовом механизме

$$\Gamma = \frac{2 \cdot f_{oe}}{f_p \cdot \cos \Phi} \quad (3)$$

для случая рикошетирования под слоем F2 и



$$\Gamma = (4 * f_{oe}^2) / (f^2 * \text{Cos}\Phi) \quad (4)$$

p

для рикошетирования под слоем E. Первый случай даёт более низкое затухание, когда волна идет в самом верхнем слое ионосферы и почти не затрачивает энергии на поглощение. Второй случай даёт более высокое затухание, когда волна идет в самых нижних слоях ионосферы, где поглощение больше, чем в верхних слоях. Все значения в формулах те же, что и для скачкового механизма. По этим формулам мы высчитали затухание на данной трассе, результаты расчетов представлены в таблице 2 (ВСТАВИТЬ ТАБЛИЦУ), после чего мы сравнили потери при использовании скачкового механизма и хордового. Для того чтобы иметь возможность оценить затухание для различных длин трассы был построен график на рисунке 8. Как видно из таблицы и графика затухание сигнала для хордового механизма в несколько раз ниже, чем для скачкового, особенно для рикошетирования под слоем F2.

Таким образом мы показали, что хордовый механизм является более экономичным для осуществления дальних ионосферных связей. Получены также количественные оценки уменьшения затухания для хордового механизма по сравнению со скачковым в зависимости от длины трассы.

## 9. Обсуждение результатов

Учитывая показанную перспективность использования хордового механизма с точки зрения низкого затухания сигнала, следует иметь в виду, что для его реализации необходимо наличие в области входа первого скачка больших градиентов электронной концентрации соответствующего знака. Они могут быть получены либо при изменении высоты максимума отражающего слоя, либо при изменении концентрации электронов в максимуме. Эти градиенты должны быть особенно велики для реализации

*Теренин С. Механизмы распространения ионосферных радиоволн...* 9

рикошетирования сигнала под слоем F2. В естественных условиях появление таких градиентов наблюдается на границе дневной и ночной ионосферы, определяемой линией терминатора. Причем необходимая величина градиента наблюдается в направлении поперечном линией терминатора. Таким образом практическое использование такого механизма наиболее целесообразно для радиотрасс поперечного терминатору направления. Вместе с тем в ионосфере довольно часто присутствуют неоднородности с размерами достаточными, чтобы обеспечить отражение радиоволны и выход её на рикошетирование. Это приводит к тому что распространение хордовым механизмом наблюдается иногда и на трассах другого направления в виде сигналов кругосветного эхо. Однако, для организации постоянной стабильной работы дальней трассы использование таких однородностей не подходит, так как их появление в нужных местах не гарантировано. Вместе с тем, для особо важных радиотрасс может быть реализовано искусственное создание таких неоднородностей за счет воздействия на ионосферу мощным радиоизлучением, направленным вертикально.

## **Заключение**

Несмотря на то, что механизмы сверхдальнего распространения радиоволн достаточно очевидны, количественное описание их энергетического выигрыша по сравнению с обычным скачковым, исследовано пока еще слабо. В нашей работе предпринята попытка получить приближенные оценки такого выигрыша. На данном этапе получены оценки для скачкового и хордового механизмов, построены зависимости минимального затухания сигнала от дальности трассы. Показано, что затухание сигнала для хордового механизма в несколько раз ниже, чем для скачкового, особенно для рикошетирования под слоем F2. Таким образом хордовый механизм является более экономичным для осуществления дальних ионосферных связей. Вместе с тем, для его реализации требуется наличие существенных градиентов электронной концентрации в областях входа и выхода сигнала в подслоный волновод.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мигулин В. Как исследуют ионосферу. Радио, 1981. № 5-6. с. 33-34.
2. Лучевое приближение и вопросы распространения радиоволн. Сборник статей под редакцией М. Кияновского. - М., Наука, 1971.
3. Краснушкин П. Метод нормальных волн в применении к проблеме дальних радиосвязей. - МГУ, 1947.
4. Краснушкин П. Дх-ах. - Радио всем. 1928, № 12, с, 26.
5. Долуханов.М.П. Распространение радиоволн.
6. <http://qrz.ru/solar/tutorial/> - Введение к прохождению радиоволн на кв.
7. <http://qrz.ru/solar/articles/long.shtml> - О сверхдальнем распространении на кв.
7. <http://qrz.ru/solar/articles/over1.shtml> - Снова сверхдальняя радиосвязь.
8. Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев - Физика для 11 классов.

Рисунок 1

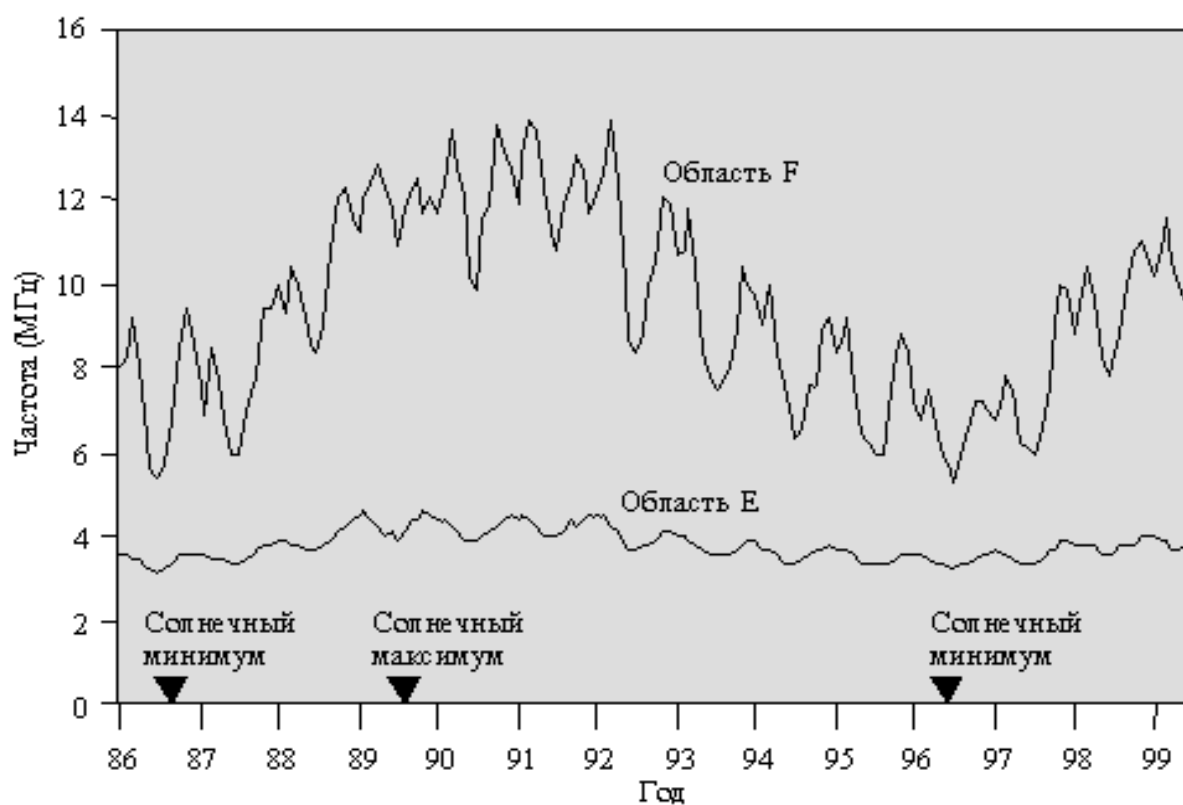


Рисунок 2

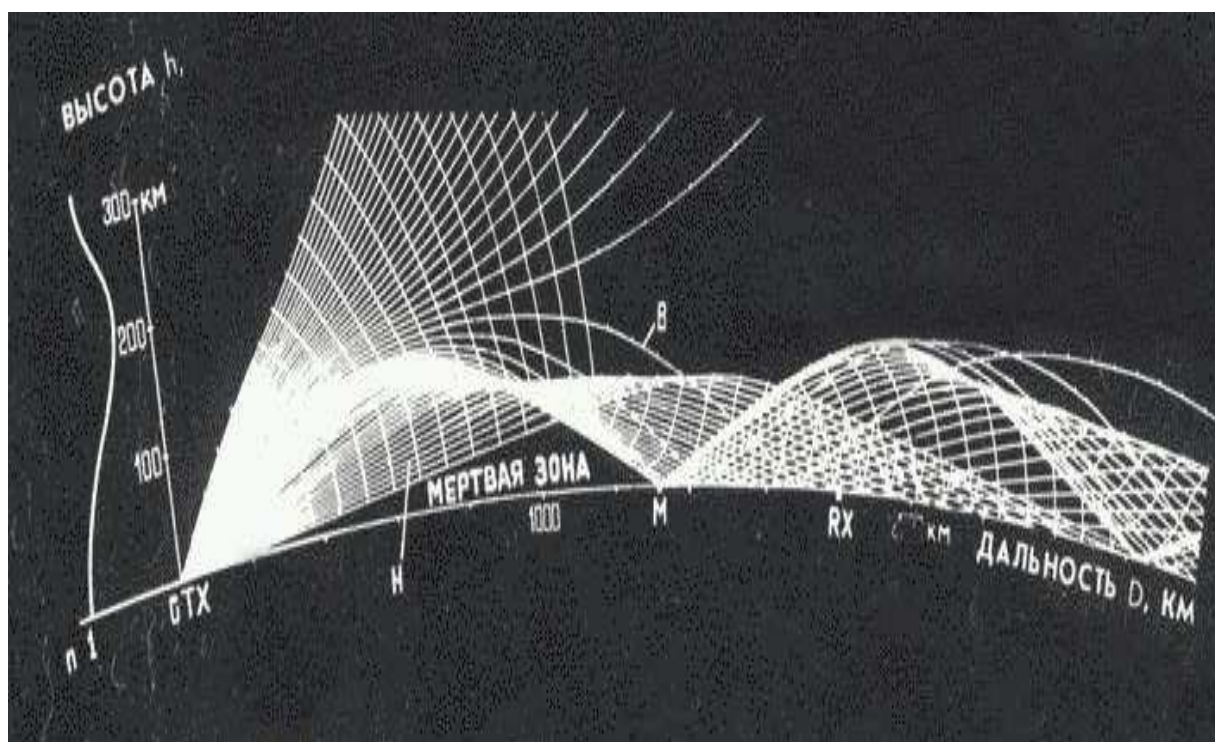


Рисунок 3

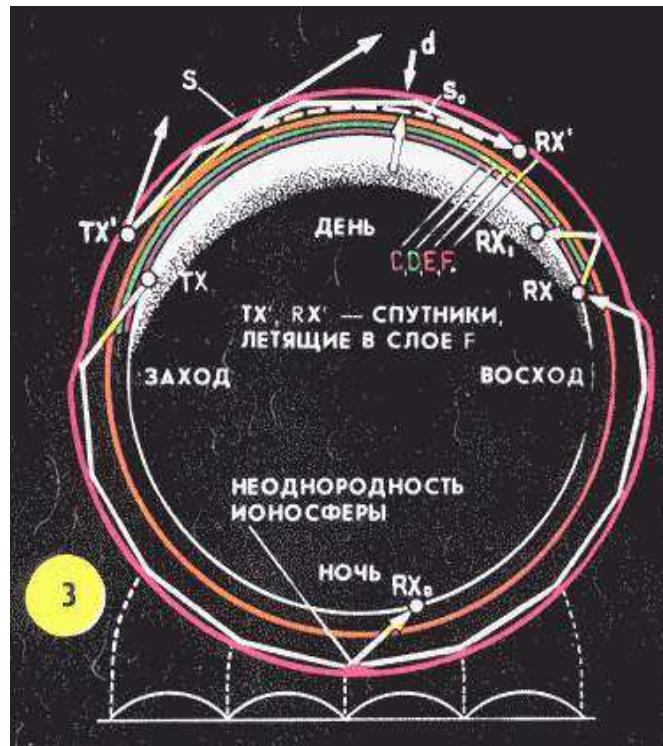


Рисунок 4

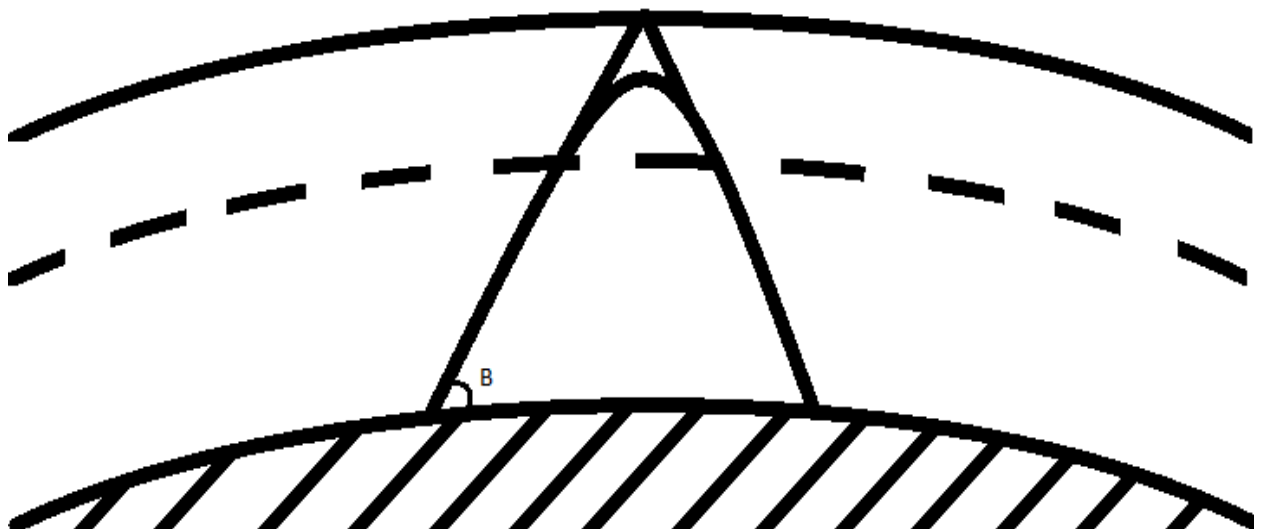


Рисунок 5

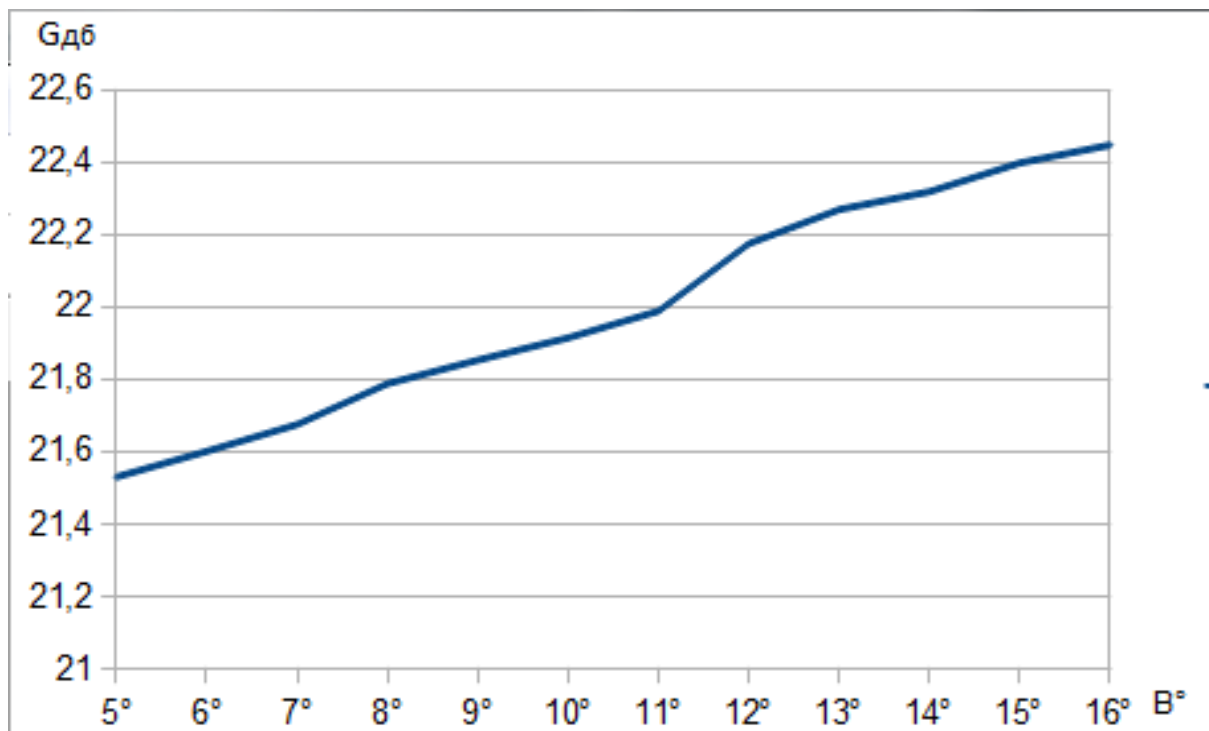


Рисунок 6



Рисунок 7

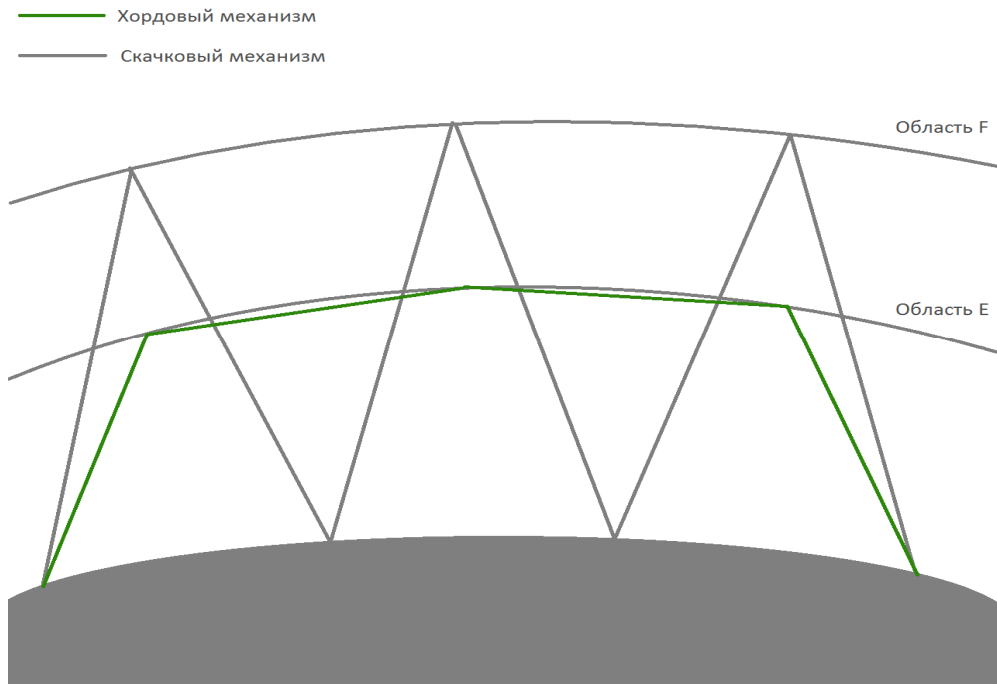


Рисунок 8

