

Распространение радиоволн в ионосфере

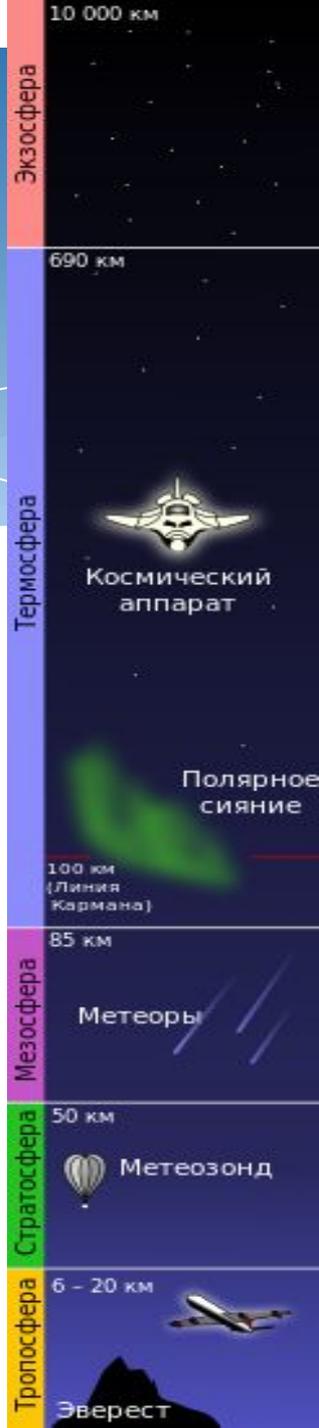


Ионосфера

Ионосфера - верхняя часть атмосферы Земли, состоящая из

- мезосферы,
- мезопаузы,
- термосферы,

сильно ионизирующаяся вследствие облучения рентгеновским и УФ излучением Солнца.



Механизм ионизации

- Ионосфера представляет собой плазму, квазинейтральную в пределах макрообъёма. Свободные заряды появляются в ионосфере в процессе ионизации.
- Процесс ионизации заключается в отрывании одного или нескольких электронов от наружной оболочки атома. Для удаления электрона из сферы притяжения необходимо затратить определенную работу выхода.

Виды ионизации

- Фотоионизация

При фотоионизации газ должен подвергнуться воздействию излучения с энергией $h\nu > W$,

где $h\nu$ – энергия фотона,

h – постоянная Планка,

W – работа ионизации.

- Ударная ионизация

При ударной ионизации причиной вырывания электрона является попадание в молекулу или атом частицы (корпускулы), обладающей достаточным запасом кинетической энергии.

Источники ионизации

Фотосфера Солнца излучает непрерывный спектр ЭМ волн в широком диапазоне частот; хромосфера и солнечная корона испускают мягкое рентгеновское излучение (2-100 ангстрем) и ультрафиолетовое излучение (100-300 ангстрем).

На диапазон ионизирующих лучей приходится только $2 \cdot 10^{-6}$ всей излучаемой Солнцем ЭМ энергии.

Источники ионизации

- космические лучи несолнечного происхождения (ионизация нижних слоев)
- космическая пыль
- метеоры, сгорающие в атмосфере

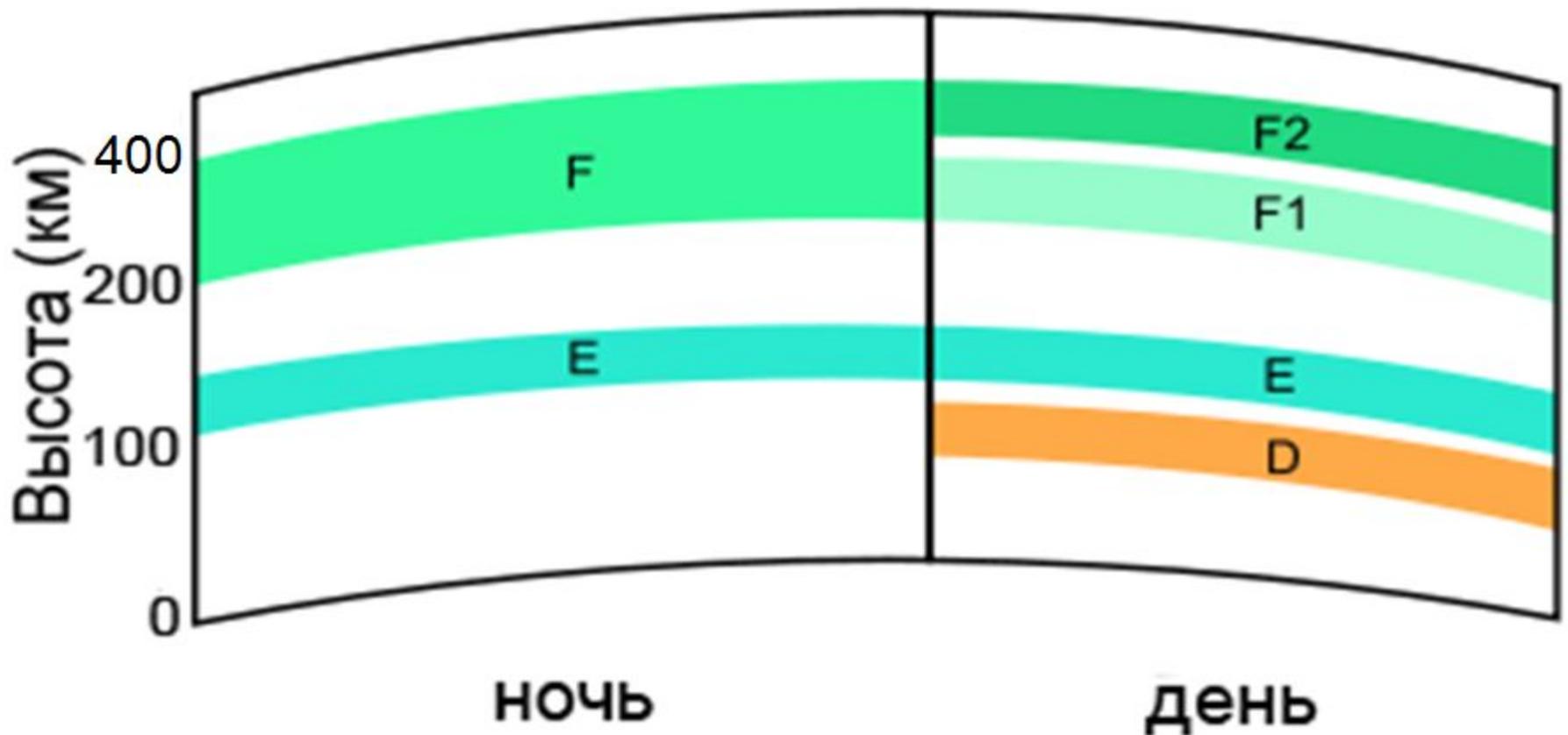
Строение ионосферы

Степень ионизации становится существенной уже на высоте 60 километров и неуклонно увеличивается с удалением от Земли.

В зависимости от плотности заряженных частиц N в ионосфере выделяются слои

- D
- E
- F

Строение ионосферы

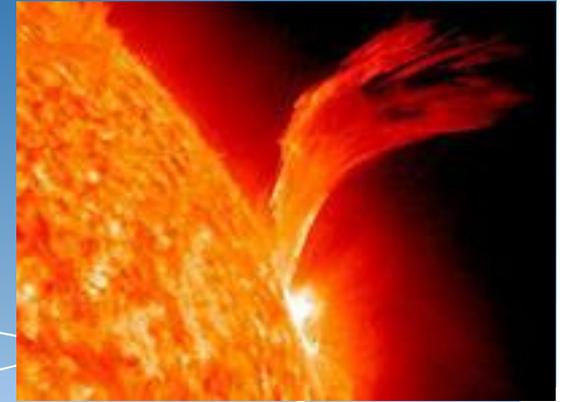


Откуда берутся слои?

ЭМ волны испускаются во всём спектре от гамма-лучей до радиоволн, однако строение и состояние ионосферы определяется:

- рентгеновским (ионизирует на слои D и E),
- УФ (ионизирует слой F и частично D) излучениями Солнца.

Солнечная активность



Энергия Солнца высвобождается при ядерных процессах в его внутренних областях, откуда переносится наружу и излучается солнечной атмосферой.

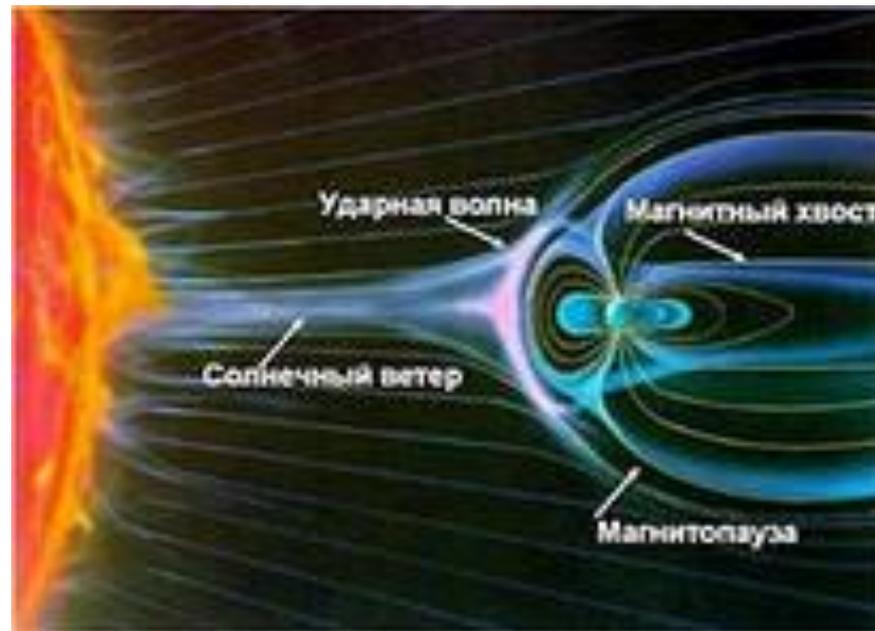
Такое излучение состоит из

- ЭМ волн
- корпускулярного излучения (частиц).

Излучение сопровождается потерей массы, примерно 80% которой расходуется на корпускулярное излучение.

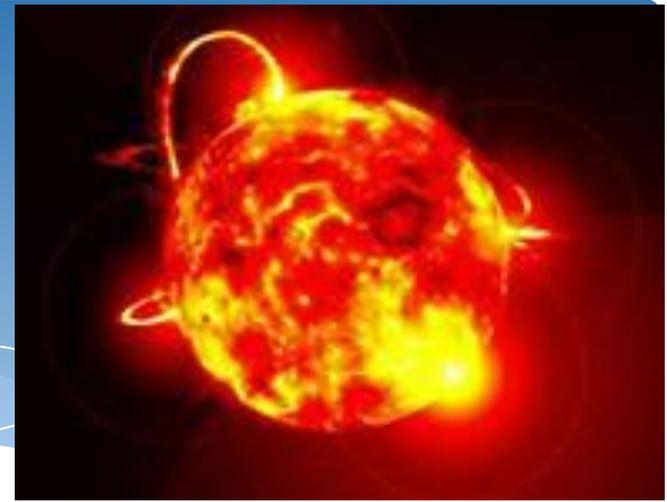
Солнечный ветер

Солнечный ветер – это поток ионизированных частиц (в основном, гелиево-водородной плазмы), истекающий из солнечной короны в окружающее космическое пространство.



Солнечные пятна

тёмные области на Солнце, температура которых понижена примерно на 1500К по сравнению с окружающими участками фотосферы.



Период колебания численности пятен составляет в среднем 11 лет и может варьироваться от 7 до 17 лет.

Пятна представляют собой видимое проявление магнитных полей исключительной интенсивности, смежные пятна часто различаются своей полярностью.

Рекомбинация

В известных условиях в ионизированном газе может наступить динамическое равновесие, когда появляющихся и рекомбинирующих свободных электронов равное количество.

Физически рекомбинация связана с беспорядочным тепловым движением, в котором пребывают электроны, ионы и нейтральные молекулы, в процессе которого электрон и ион могут оказаться настолько близко друг от друга, что под действием кулоновских сил превратятся в нейтральный атом или молекулу.

Рекомбинация

Исчезновение свободных зарядов после внезапного прекращения действия ионизирующего излучения.

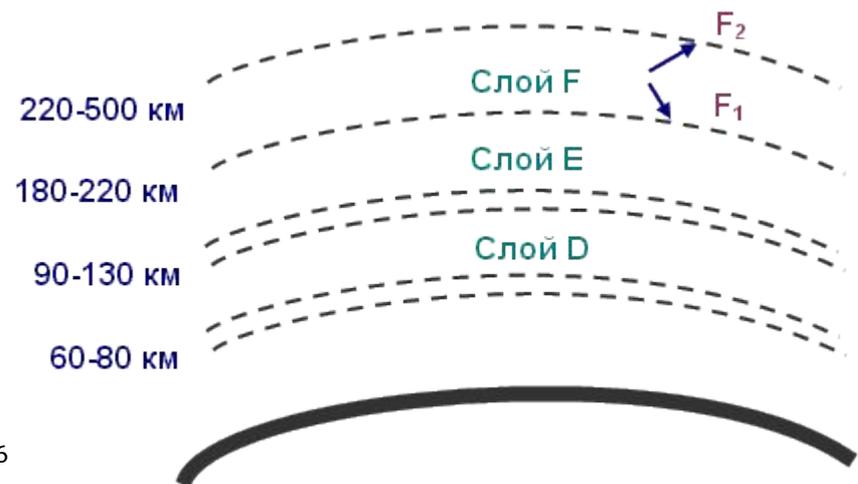
Радиационные пояса

Самую внешнюю оболочку ионосферы составляют радиационные пояса, которые представляют собой области, имеющие конфигурации магнитных силовых линий и состоящие из заряженных частиц, захваченных магнитным полем Земли.

Радиационный пояс представляет собой гигантскую магнитную ловушку, которая захватывает выбрасываемые Солнцем заряженные частицы — электроны и протоны, совершающие внутри пояса колебательные и вращательные движения вдоль и вокруг магнитных силовых линий.

Слой F₂

- высота образования 230-400 км
- концентрация электронов максимальна ($\sim 10^6$ 1/см³)
- дальняя КВ связь осуществляется за счёт отражения от слоя F₂ (существует и в ночное время в несколько ослабленном виде)
- концентрация минимальна перед восходом

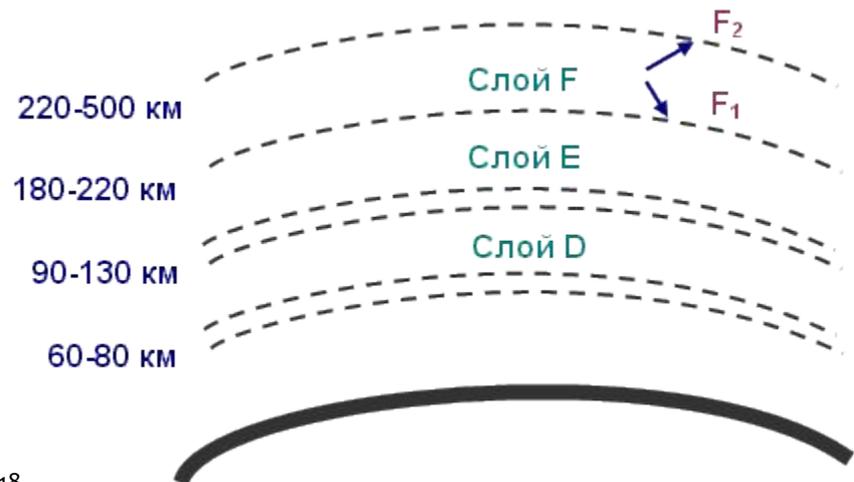


Аномалии слоя F₂

- дневная (максимум концентрации наблюдается не в полдень, а вскоре после него)
- ночная (продолжающийся рост ионизации в отсутствие солнечного света)
- полярная (явление полярной ночи)
- сезонная (концентрация электронов зимой больше, чем летом)

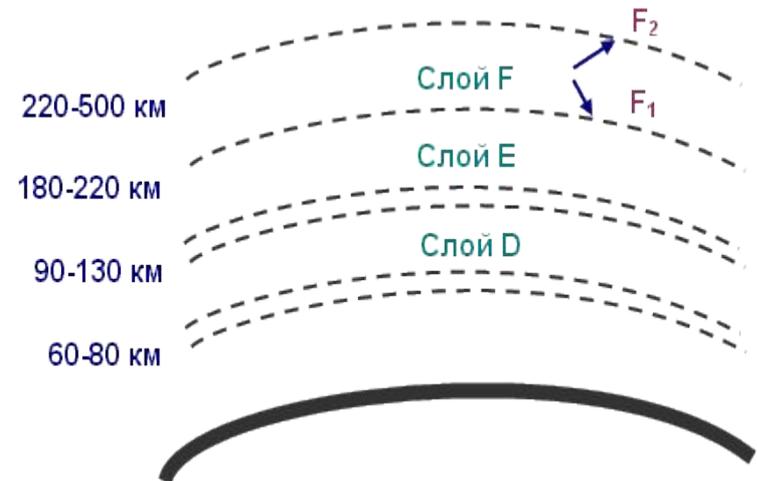
Слой F1

- высота образования 200-280 км
- концентрация электронов $\sim 400 \cdot 10^3$ 1/см³
- формируется лишь в течение дня, сопутствует формированию F2;
- отделён от F2 областью пониженной концентрации электронов
- поглощение в этом слое препятствует прохождению КВ к слою F2



Слой E

- высота образования 110-130 км
- концентрация электронов $\sim 100 \cdot 10^3$ $1/\text{см}^3$
- почти полностью исчезает ночью



Слой Es

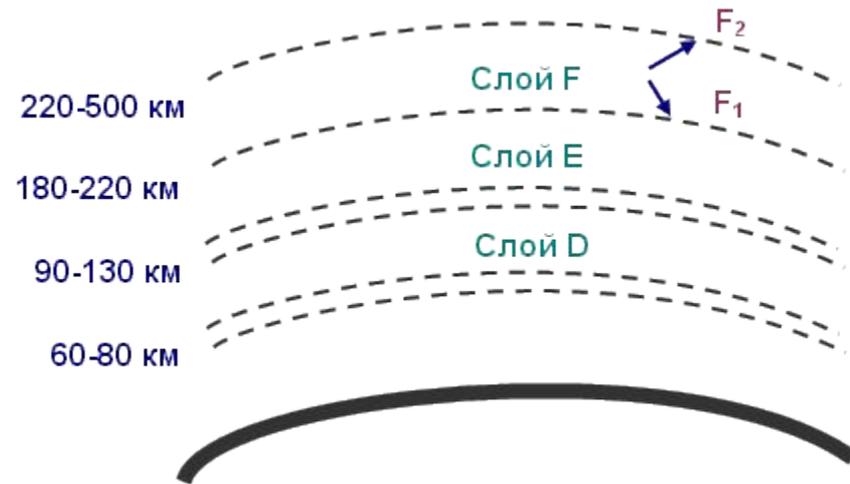
- спорадический слой Es представляет собой частое, но нерегулярное явление;
- он имеет структуру, больше похожую на облачность, поэтому его относят к возмущениям ионосферы;
- его протяженность — от десятков до сотен километров; также он может довольно быстро перемещаться в горизонтальном направлении;
- вероятность его возникновения увеличивается с ростом геомагнитной широты.

Слой E_s

- электронная концентрация этого слоя до 10 раз больше концентрации нормальной области E .
- по высоте - достаточно устойчив, высота его расположения отличается не более чем на 5-10 км относительно высот нормальной области E .
- время существования E_s колеблется в широких пределах, но не превышает несколько часов.

Слой D

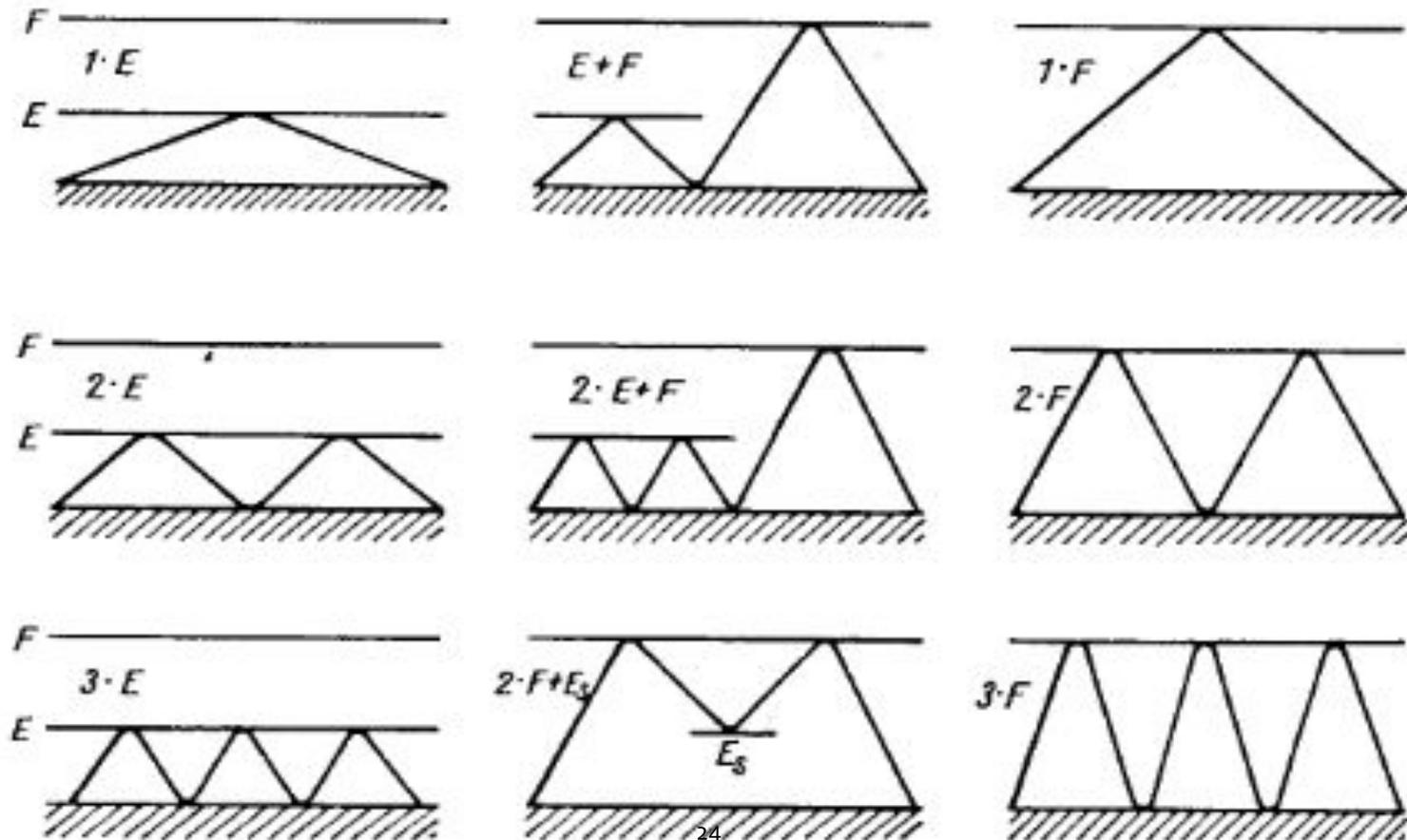
- высота образования 70-90 км
- концентрация электронов очень низкая, поэтому отражаться могут только самые длинные волны
- быстро исчезает после захода Солнца
- дальнейшему распространению не способствует, является чисто поглощающим



Характеристики слоев ионосферы

Слой	Высота нижней границы, км	Полутолщина слоя, км	Макс. электронная плотность, N, 1/м ³		Число столкновений электронов, 1/с
			день	ночь	
D	50...60	-	$8 \cdot 10^9$	0	10^7
E	100...120	15...20	$2 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^9$	10^5
F1	160...180	20...100	$4 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^9$	10^4
F2	200...250	50...300	$2 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{11}$	10^3

Некоторые ионосферные отражения радиоволн



Гиромангнитный резонанс

- Распространение радиоволн происходит в однородном ионизированном газе при наличии постоянного магнитного поля.
- Наличие постоянного магнитного поля придаёт ионизированному газу свойства анизотропной среды. Влияние проявляется прежде всего в том, что под действием электрического поля электроны совершают не прямолинейное колебательное движение, а перемещаются по более сложным траекториям.

Гиромангнитный резонанс

Как только электрон приобретает скорость (изначально вдоль оси Z), на него начинает действовать сила Лоренца со стороны магнитного поля.

Если предположить, что после того, как электрону была сообщена скорость, поле волны исчезнет, то под влиянием силы Лоренца электрон начнёт двигаться по криволинейной орбите.

Гироманитный резонанс

Время обращения по окружности не зависит от начальной скорости и является для данного значения напряженности магнитного поля Земли величиной постоянной, поэтому явление вращательного движения электронов в постоянном магнитном поле получило название гироманитного резонанса. Его частота определяется формулой

$$f_M = \frac{1}{T} = \frac{e\mu_0 H_0}{2\pi m} \approx 1.4 \text{ МГц.}$$

Гиромангнитный резонанс

- Если же волна не прекращает своего действия, траектория приобретает более сложную форму; однако при всех условиях эта траектория сохраняет элементы вращательного движения.
- В связи с этим при распространении плоской волны могут возникнуть дополнительные составляющие электрического поля волны, приводящие к повороту плоскости поляризации и двойному лучепреломлению — явлениям, проявляющимся в анизотропных телах.

Ионосферные волны

- Определение: радиоволны, распространяющиеся на большие расстояния и **оггибающие земной шар** в результате однократного или многократного отражения от ионосферы (в диапазоне волн длиннее 10 м), а также волны, **рассеивающиеся на неоднородностях ионосферы и отражающиеся от ионизированных следов метеоров** (в диапазоне метровых волн), получили название **ионосферных** или **пространственных волн**.

Преломление и отражение радиоволн в ионосфере

- * Реальная ионосфера – неоднородно ионизированный газ.
- * Распространение радиоволн происходит по криволинейным траекториям.
- * «Плоская ионосфера» состоит из рядов плоских слоев малой толщины, в пределах которых электронная концентрация N имеет постоянное значение.

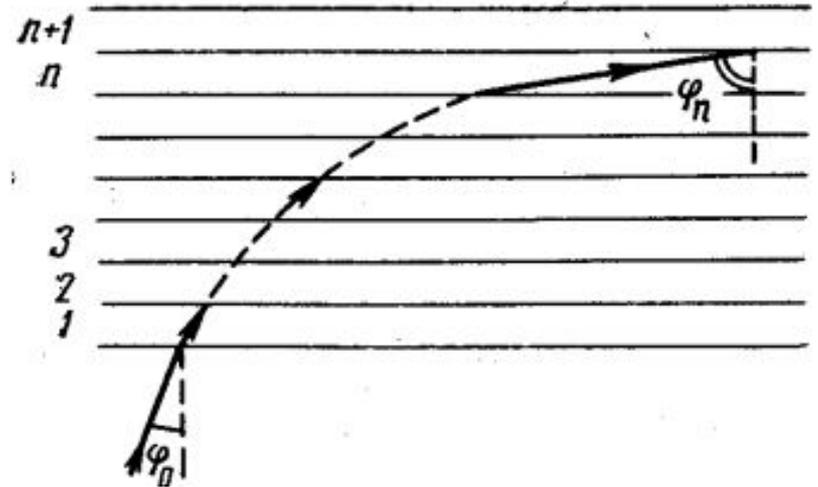
$$0 < N_1 < N_2 < \dots < N_n < N_{n+1}$$

Преломление и отражение радиоволн в ионосфере

- * Пусть на самый нижний слой из области неионизированного воздуха падает луч частоты f под углом φ_0
- * После достаточного числа преломлений угол падения у n -го слоя приблизится к 90°

Преломление и отражение радиоволн в ионосфере

Если $\sin \varphi_0 = n_n$ луч у n -го слоя становится пологим



Условие поворота

- * Поворот волны в вершине траектории есть ее полное внутреннее отражение.
- * Оно возникает, когда при переходе из оптически более плотной в оптически менее плотную среду (меньшее значение n), угол падения превышает критическое значение

$$\varphi_{\text{кр}} = \arcsin(n_{n+1} / n_n)$$

Это условие поворота справедливо только для ионосферы, состоящей из дискретных слоев.

Условие поворота в реальной ионосфере

- * В реальной ионосфере показатель преломления ионосферы меняется плавно, следовательно, условие поворота должно основываться на предположении, что радиоволна может вернуться на Землю, только если в вершине траектории ее радиус кривизны меньше величины $(a+h)$,
где a – радиус Земли,
 h – высота точки поворота над Землей.

Условие поворота в реальной ионосфере

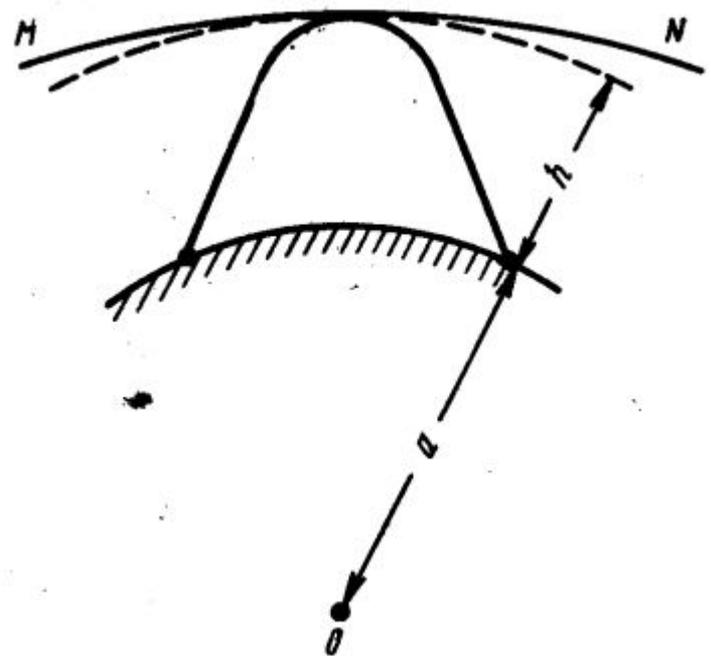
$R = n/\sin \varphi(-dn/dh)$ – радиус кривизны траектории волны, распространяющейся в слоистой атмосфере.

n – коэффициент преломления

φ – угол элемента траектории с вертикалью.

В вершине траектории $\varphi = 90^\circ$,

$$R = n/(-dn/dh)$$



Условие поворота в реальной ионосфере

*Для ионосферы коэффициент преломления определяется выражением $n = \sqrt{\epsilon_{\text{и}}}$

$\epsilon_{\text{и}}$ - диэлектрическая проницаемость ионосферы

Подставив в дополнительное условие поворота радиоволны $R < a+h$ значение радиуса кривизны траектории волны, распространяющейся в слоистой атмосфере, получим условие поворота в неслоистой ионосфере

$$dN/dh = 2n^2f^2/80,8(a+h)$$

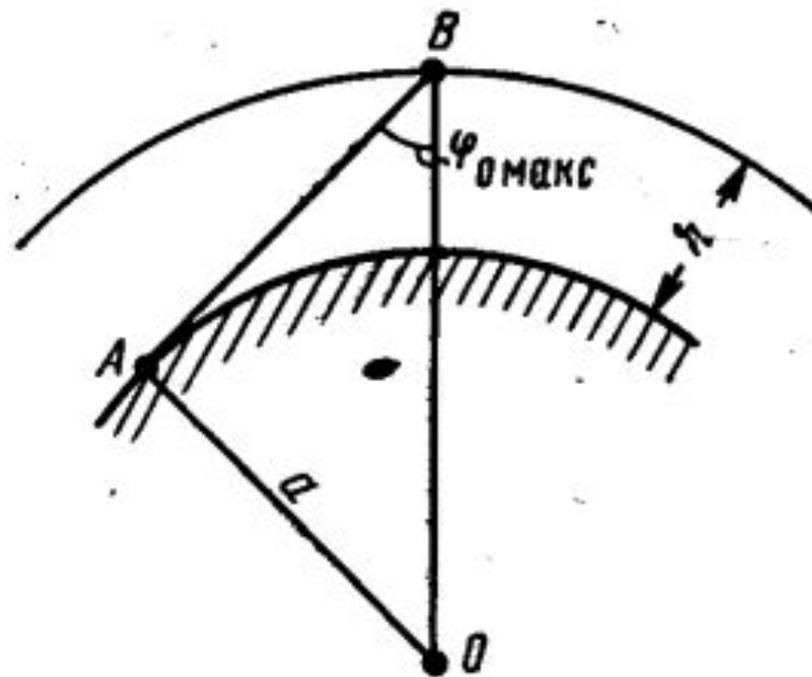
Максимальная и критическая частота

- * Из условия отражения ($\sin \varphi_o = n_n$) следует, что при данном значении электронной концентрации в области максимума всегда можно подобрать такое значение угла падения на нижнюю границу ионосферы, при котором условие поворота будет выполнено.

Максимальная и критическая частота

Благодаря сферической форме Земли верхние значения угла падения ограничены условием:

$$\varphi_{\text{оmax}} = a/(a+h)$$



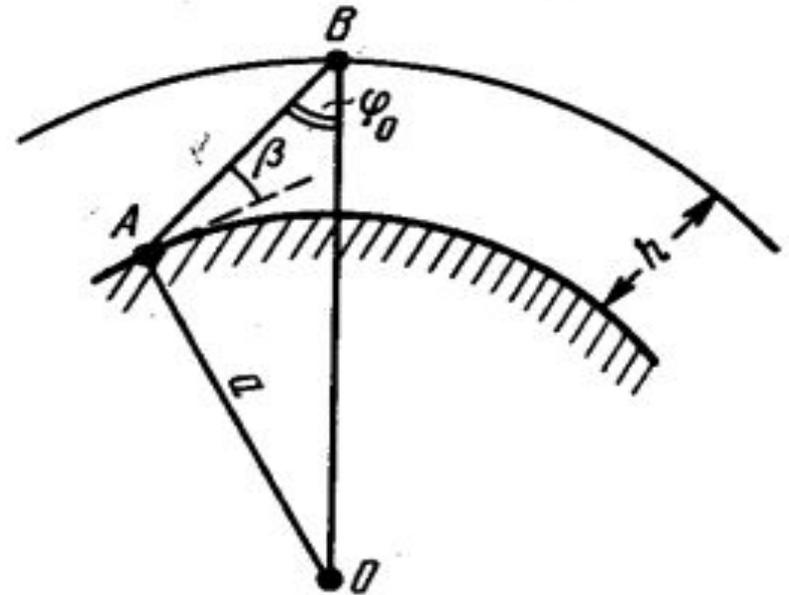
Максимальная и критическая частота

- * $f_{\text{макс}} = \sqrt{\frac{80,8N_{\text{макс}}(1+2h/a)}{\sin^2 \beta + 2h/a}}, \text{ Гц}$

- * β – угол места,

- * $N_{\text{макс}}$ - максимальная электронная концентрация для данного слоя

$$f_{\text{макс}} = \sqrt{(80,8N_{\text{макс}})/(\cos \varphi_0)^2}$$



Максимальная и критическая частота

$$f_{\text{макс}} = \sqrt{(80,8 \cdot N^3) / (\cos \varphi_0)^2}$$

Максимальная и критическая частота

*Очевидно, что наибольшего значения $f_{\text{макс}}$ достигает при угле места $\beta = 0$ (пологий луч)

При $\beta = 90^\circ$ формула принимает вид:

$$f_{\text{кр}} = \sqrt{80,8N_{\text{макс}}}, \text{ Гц}$$

Критическая частота – это наибольшая частота, при которой радиоволны отражаются от данного слоя ионосферы при вертикально направленном луче.

Влияние ионосферы на распространение прямых волн

- * Поляризационные потери мощности – **эффект Фарадея** обусловлен тем, что линейно поляризованная волна под воздействием магнитного поля Земли расщепляется на две составляющие, распространяющиеся с различными фазовыми скоростями. В результате между составляющими радиосигнала появляется фазовый сдвиг, приводящий к повороту плоскости поляризации результирующей волны.

Поляризационные потери мощности

- * Угол поворота плоскости поляризации в градусах можно найти по следующей формуле:

$$\Psi_{\Phi} = \frac{2,32 \cdot 10^{19}}{f_{\text{нес}}^2 \sqrt{1 - 0,9 \cos^2 \alpha}}$$

- * Поляризационные потери, в дБ

$$L_{\Phi} = -20 \lg |\cos \Psi_{\Phi}|$$

Для частот выше 10 ГГц угол поворота плоскости поляризации не превышает 1° ; считается, что эти потери можно не учитывать для частот выше 3 ГГц.

Ионосферная рефракция

Угол ионосферной рефракции или угол отклонения от прямолинейного распространения для стандартной атмосферы можно определить по формуле:

$$\delta_{\text{И}} = \frac{-57,3 \cos \varphi}{f_{\text{нес}}^2 \sin^2 \varphi}$$

Средние значения угловой девиации при распространении радиоволн через атмосферу с учетом экспериментальных данных определены в Рекомендации МСЭ-R P.834

Задачи

1. Рассчитать дневную и ночную критические частоты для слоя F2
2. Определить дневную и ночную МПЧ для радиоволны, падающей на слой F2 под углом 60°