

В тропосфере температура убывает с высотой с градиентом порядка $5-6^\circ\text{C}/\text{км}$. На верхней границе тропосферы температура составляет примерно 220 K (-50°C). Такой она сохраняется до 25 км . Потом снова возрастает до максимального значения 350 K (77°C) на высоте $50-60\text{ км}$. На высоте 80 км – снова минимум (230 K) и дальше снова рост до примерно 1000 K .

Расчет давления проводится по барометрической формуле

$$p_h = p_0 e^{-\frac{Mg_h}{RT}}$$

Здесь M – средний молекулярный вес газов атмосферы; g – ускорение свободного падения, $R = 8,31 \cdot 10^7$ эрг. град/моль – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура.

Величина $\frac{RT}{Mg}$ носит название «приведённой высоты атмосферы». Это высота атмосферы постоянной плотности, создающей такое же давление, как и действительно наблюдаемое. Для $T=273\text{ K}$ она составляет $H=8\text{ км}$. Тогда

$$p_h = p_0 e^{-\frac{h}{H}}$$

Механизмы ионизации.

1. *Фотоионизация*. На вырывание электрона из атома затрачивается работа выхода W .

Если

$$h\omega > W \quad (*)$$

– происходит ионизация. $h\omega$ – энергия кванта, ω – ионизирующая частота, то есть частота, которая может ионизировать данный газ.

Если выбиваемые электроны имеют малую скорость, общий баланс энергии в пренебрежении релятивистскими эффектами записывается в виде:

$$h\omega = W + mv^2/2.$$

Здесь второй член в правой части уравнения относится к выбитому электрону.

Увеличение интенсивности излучения, частота которого не удовлетворяет уравнению (*), (т.е. увеличение числа квантов), не может привести к возникновению ионизации.

2. *Ударная ионизация*. Причиной служит попадание в атом или молекулу корпускулы, обладающей достаточным запасом энергии. Условие ионизации:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} > W$$

Полный баланс энергии

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} = W + \frac{m_2 v_{12}^2}{2}.$$

Индекс 1 относится к частице, индекс 2 – к выбиваемому электрону.

Энергией кванта, достаточной для ионизации атмосферных газов, обладают только короткие УФ лучи с длиной волны меньше или равной 1000 ангстрем.

Разная температура ведет к разной плотности, а это в свою очередь становится причиной разного количества возмущенных молекул. Добавим еще разную работу выхода. Все это приводит к возникновению разных слоев.

Ионосфера – ионизованная область атмосферы. Граница нижняя – порядка 60 км, верхняя – около 20000 км.

Источники ионизации:

1. Ультрафиолетовое излучение Солнца и мягкое (от восьми до 300 ангстрем) рентгеновское излучение солнечной короны с кинетической температурой порядка 10^6 K при интенсивности около 0.1 эрг/см²·сек.
2. Корпускулярные потоки, выбрасываемые Солнцем, попадают в атмосферу и сталкиваются с молекулами и атомами атмосферных газов, что приводит к ионизации. Об интенсивности можно судить по ионосферным и магнитным бурям, полярным сияниям, свечению ночного неба и пр. Интенсивность ионизации, вызванной корпускулярным излучением, составляет примерно 50% от интенсивности ионизации ультрафиолетовым излучением.
2. Космические лучи. Их ионизационная способность невелика и составляет примерно 10^{-8} ионизирующей способности УФ.
4. Метеоры. В результате ионизации создаются ионизированные цилиндрические столбы диаметром в несколько сантиметров и длиной от нескольких метров до нескольких километров. Линейная плотность ионизации, равная отношению числа электронов к единице длины ионизированного столба, составляет примерно 10^{10} – 10^{16} электронов/м. Длительность существования - от десятых долей секунды до нескольких минут.

5. Одновременно с ионизацией идет рекомбинация, - обратное воссоединение с образованием нейтральных молекул.

Ионосфера – это ионизированный газ (плазма), электродинамические параметры которого определяются движением электронов и ионов. Масса ионов велика по сравнению с массой электронов, поэтому их действием пренебрегаем, кроме самых низких частот.

Будем рассматривать эту среду как однородную плазму.

Плотность полного тока в однородной плазме без учета столкновений и действия магнитного поля Земли

$$j = \frac{\varepsilon}{4\pi} \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial E}{\partial t} + eNu,$$

e – заряд электрона, N - электронная концентрация, u - скорость электрона.

При этом

$$m \frac{du}{dt} = eE.$$

Если поле синусоидальное, получаем, что диэлектрическая проницаемость всегда меньше единицы и сильно зависит от частоты:

$$\varepsilon = 1 - \frac{4\pi e^2 N}{m\omega^2} = 1 - 3.18 \cdot 10^9 \frac{N}{\omega^2}.$$

$$n = \sqrt{\varepsilon} = \sqrt{1 - \frac{4\pi e^2 N}{m\omega^2}}$$

или

$$n = 1 - 80,8 \frac{N(\text{эл/см})}{f^2 \text{ КГц}}$$

Фазовая скорость

$$v = \frac{c}{n} = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{4\pi e^2 N}{m\omega^2}}}$$

Зависимость от циклической частоты определяет дисперсионные свойства среды.

Групповая скорость $v_g = \frac{c}{d(n\omega)}$ - определяет скорость, с которой переносится основная

часть энергии группой волн.

Можно показать, что произведение фазовой и групповой скорости равно квадрату скорости света в свободном пространстве:

$$v\varpi = c^2.$$

Для ионосферы всегда

$$v > c \text{ и } \varpi < c.$$

Поскольку форма траектории волны определяется фазовой скоростью, знание этой величины необходимо для анализа отражения и преломления в ионосфере. Знание групповой скорости нужно для определения времени, необходимого сигналу для прохождения заданного расстояния в ионосфере.

Ионосфера – неоднородная среда со сложным распределением ионизации (по пространству и времени). Обычно рассматривают плоскую ионосферу (при вертикальном распространении). При медленном изменении показателя преломления с высотой в области, где

$$\left[\frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{\left| \frac{dn}{dz} \right|}{n^2} \right] \ll 1$$

справедливы законы ГО. Концентрация электронов монотонно увеличивается с высотой, следовательно, диэлектрическая проницаемость и показатель преломления с высотой будут уменьшаться. На высоте $z = z_1$ ($\varepsilon(z) < 0$) они обратятся в нуль. При этом фазовая скорость будет стремиться к бесконечности, - законы ГО нарушаются, происходит полное отражение электромагнитной волны. Для $z > z_1$ показатель преломления становится мнимым и бегущие волны распространяться не могут, - в этой области поле быстро убывает с увеличением высоты.

Наибольшая частота, отражающаяся при вертикальном падении, носит название критической частоты. Если частота больше критической, - волна проходит, если меньше – отражается. При

$\omega = \omega_{кр}$ в рассматриваемом приближении $\varepsilon(\omega_{кр}) = 0$ и $n(\omega_{кр}) = 0$, откуда

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{4\pi e N_{\max}}{m}}.$$

Плазменная частота

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{\frac{e^2 N}{m\varepsilon_0}}$$

$$f_0 = \sqrt{80.8 N}$$

Относительная диэлектрическая проницаемость ионосферы

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = 1 - \frac{e^2 N}{m \varepsilon_0 \omega^2}$$

меньше диэлектрической проницаемости вакуума. В отличие от тропосферы, где диэлектрическая проницаемость незначительно отличается от единицы, превосходя её.

В ионосфере диэлектрическая проницаемость может принимать какие угодно значения, меньшие единицы. На расстояниях порядка длины волны параметры ионосферы могут меняться существенно, длина волны оказывается много больше длины волны в свободном пространстве. Имеет место фактически полное внутреннее отражение. ГО неприменима.

Распространяющаяся волна приводит в движение электроны. Они сталкиваются с нейтральными молекулами и ионами и передают им часть энергии, полученной от электромагнитной волны, - наблюдается поглощение. В уравнение для плотности полного тока теперь будет входить комплексная диэлектрическая проницаемость

$$\varepsilon^* = \varepsilon - i \frac{4\pi\sigma}{\omega}$$

Магнитное поле Земли влияет на движение электронов ионосферной плазмы, обусловленное распространяющейся волной. Это действие характеризуется силой Лоренца

$$F = \frac{e}{c} [uH]$$

Постоянное однородное магнитное поле H_0 заставляет электрон описывать окружности, если его начальная скорость $u_0 \perp H_0$.

Частота равномерного обращения электрона массы m , - гироскопическая частота, -

$$f_H = \frac{\omega_H}{2\pi} = \frac{|e|H_0}{2\pi mc} = 2.8 \cdot 10^6 H_0 \text{ Гц}$$

$$H_0 = 0.5 \text{ э} \quad \mapsto \quad f_H = 1.4 \text{ МГц}$$

Сила Лоренца будет входить в исходное уравнение движения электрона. таким образом ионосферная плазма становится анизотропной, диэлектрическая проницаемость — тензорной величиной.

То есть при распространении синусоидальной волны в магнитоактивной плазме электроны описывают уже эллиптические орбиты. Вторичные волны, излучаемые электронами, являются причиной образования эллиптически поляризованных волн. Диэлектрическая проницаемость теперь описывается тензором, - среда анизотропна. Она

становится двойко преломляющей, могут появиться продольные и поперечные компоненты поляризации. Показатель преломления оказывается комплексным, разным для двух волн, - обыкновенной и необыкновенной.

В однородной магнитоактивной плазме могут распространяться две плоские эллиптически поляризованные нормальные волны, каждая со своей поляризацией, фазовой скоростью и показателем поглощения, - обыкновенная и необыкновенная.

Линейно поляризованная волна, падая на границу магнитоактивной среды, расщепляется на две эллиптически поляризованных волны с разными фазовыми скоростями, показателями преломления и коэффициентами поглощения.

Случай продольного распространения. $H_0 = H_{0z}$. Волна распространяется в направлении z .

В этом случае

$$n_{1,2}^2 = 1 - \omega_0 / \omega(\omega \pm \omega_H).$$

Отношение комплексных амплитуд $\left(\frac{E_y}{E_x}\right)_{1,2} = \mp i$.

Следовательно, обе нормальные волны поляризованы по кругу, причем для необыкновенной волны вектор электрического поля вращается (если смотреть вдоль направления распространения) по часовой стрелке, а для обыкновенной волны – против нее. Для необыкновенной волны направление вращения совпадает с направлением вращения электрона в магнитном поле H_0 , для обыкновенной волны рассматриваемые вращения противоположны.

Если

$$H_0 = H_{0y},$$

имеет место поперечное распространение. При отсутствии поглощения

$$n_1^2 = 1 - \omega_0^2 \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}\right) / (\omega^2 - \omega_H^2 - \omega_0^2),$$

$$n_2^2 = 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}.$$

То есть электрическое поле обыкновенной волны действует вдоль магнитных силовых линий внешнего поля H_0 . Следовательно, H_0 не влияет на движение электронов,

вызванное электрическим полем обыкновенной волны. Поэтому обыкновенная волна распространяется так же, как и при отсутствии H_0 .

Необыкновенная волна, - компоненты x и z , - поляризована эллиптически с компонентой z вдоль направления распространения волны.

При продольном распространении обыкновенная и необыкновенная волны поляризованы по кругу с левым и правым вращением, если смотреть в направлении распространения волны.

Отражение обыкновенной и необыкновенной волн происходят на разных высотах ($n_o = 0, n_e = 0$).

Ионосферные станции. Действующая высота отражения. Зависимость действующей высоты от частоты. На ионограмме (зависимость критической частоты от высоты) можно наблюдать соответствующие отражения.

При возвратно-наклонном зондировании

$$f_{\text{накл}} = f_{\text{верт}} \sec \varphi_0,$$

где φ_0 - угол между вертикалью и входящим в ионосферный слой лучом. То есть вертикальный луч и наклонный отражаются на одной и той же высоте.

Слой D – самый низкий, высота около 60 км. Плотность воздуха значительная, в основном образуются ионы, концентрация электронов всего 10^3 эл/см³. Отсюда $KВ$ и $СВ$ поглощаются, $ДВ$ – отражаются. Существует только днём.

Слой E – высота около 100 км. Критическая частота порядка 3-4 МГц днем, ночью 0.6 – 0.9 МГц. Образуется за счет диссоциации молекул кислорода. $СВ$ отражаются.

Слой F_1 – высота порядка 180 км. Образуется за счет столкновений электронов. Критическая частота 4-6 МГц.

Слой F_2 – высота порядка 300 км. $N = 2 \cdot 10^6$ эл/м³ в зимний полдень.

Ионосфера – среда с дисперсией. Поэтому форма импульса при распространении в ней искажается.

Нелинейные явления в ионосфере. Пусть одна мощная станция излучает модулированную по амплитуде волну. Волна воздействует на ионосферу, создавая в ней область с модулированными параметрами. Волна другой радиостанции, проходя через эту область, также становится модулированной, - Люксембург-Горьковский эффект.