

СВИСТ В КОСМОСЕ

П. БЛИОХ

КОСМИЧЕСКОЕ пространство вокруг Земли не такое уж «пустое», как иногда думают. Здесь находятся нейтральные частицы — атомы и молекулы атмосферных газов и свободные заряды — электроны и ионы, входящие в состав космической плазмы. Для нас, живущих на дне воздушного океана, очень важно знать, что происходит во всей толще, так как существует тесная связь между процессами в космосе и условиями жизни на Земле.

Измерения концентрации космических частиц, электрических и магнитных полей на больших высотах производятся с помощью приборов, устанавливаемых на спутниках и ракетах. Но существуют и другие методы. Оказывается, многие сведения об атмосфере на расстояниях в сотни и тысячи километров от Земли можно получить, не выходя из лаборатории. Примечательно, что «наземно-космические» исследования могут быть выполнены очень простыми способами. Цена необходимого оборудования примерно соответствует стоимости радиоприемника или телевизора. Для реализации этих заманчивых возможностей надо только научиться слышать «свист», идущий из космоса, о чем мы и расскажем в этой статье.

Радиоволны в нейтральном газе

Радиоволны распространяются в вакууме со скоростью света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Они представляют собой электромагнитные колебания с частотами f от единиц герц (Гц) до тысяч гигагерц ($1 \text{ ГГц} = 10^9 \text{ Гц}$). Если же иметь в виду бытовую радиоаппаратуру, то здесь используются частоты от нескольких сот килогерц (кГц) до сотен мегагерц (МГц). Нам же будут интересовать в дальнейшем частоты килогерцевого диапазона ($f = 10^3 - 10^4 \text{ Гц}$).

Распространение радиоволн в среде отличается от того, что происходит в вакууме. В среде всегда присутствуют электрически заряженные частицы. Они могут быть в «связан-

ном» состоянии (электроны в нейтральных атомах) либо в «свободном» (электроны в плазме). Кроме электронов, которые являются носителями отрицательного заряда, в среде имеются и положительно заряженные частицы — ионы. В интересующем нас диапазоне частот роль ионов невелика, так как, обладая очень большой (по сравнению с электронами) массой, они колеблются с очень малой амплитудой. Электроны же, осциллируя в электрическом поле радиоволны, сами становятся источниками электромагнитных волн той же частоты.

Таким образом в среде возникает результирующая волна, которая распространяется с иной скоростью. Изменение скорости распространения волны учитывают с помощью коэффициента преломления n , который показывает, во сколько раз скорость волны в среде v_ϕ (о смысле индекса «ф» будет сказано ниже) отличается от скорости света:

$$v_\phi = \frac{c}{n(\omega)}. \quad (1)$$

Записав $n(\omega)$ как функцию частоты волны $\omega = 2\pi f$, мы подчеркиваем тот факт, что коэффициент преломления данной среды имеет, вообще говоря, разные значения на разных частотах. Зависимость n от ω называется *дисперсией*, и она становится особенно заметной при резонансе, когда частота радиоволны ω близка к собственной частоте ω_0 колебаний электронов. Если разность частот достаточно велика, например $\omega \ll \omega_0$, дисперсия оказывается очень слабой. Вопрос о зависимости $n(\omega)$ будет играть для нас решающее значение. Поэтому нам необходимо прежде всего оценить собственные частоты колебаний электронов в нейтральном газе и в плазме.

Начнем с нейтрального газа, где электроны присутствуют только в составе атомов и молекул. Точные расчеты собственных частот проводятся методами квантовой механики, но приблизительные оценки (они нас вполне устраивают) можно получить по аналогии с самой простой колеба-

тельной системой — маятником. Напомним хорошо известную формулу для частоты колебаний маятника:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (2)$$

Здесь g — ускорение силы тяжести, а l — длина маятника. Умножив числитель и знаменатель подкоренного выражения на массу маятника m , перепишем (2) следующим образом:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{F_g}{ml}}. \quad (3)$$

Вместо ускорения g мы ввели силу тяжести $F_g = mg$. Теперь можно применить полученную формулу к колебаниям электронов. Для этого надо заменить гравитационную силу F_g на электростатическую силу F_E , которая удерживает электрон в атоме. Согласно закону Кулона, она равна $F_E = ke^2/a^2$, где $k = 9 \cdot 10^9 \text{ ф}^{-1} \cdot \text{м}$ — коэффициент в законе Кулона, $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ — заряд электрона, $a = 10^{-10} \text{ м}$ — размер атома, который в данном случае играет роль длины маятника. Подставив в формулу (3) $l = a$, получим

$$\omega_0 \approx \sqrt{\frac{ke^2}{ma^3}}. \quad (4)$$

Далее, учитывая, что масса электрона $m = 9 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$, находим $\omega_0 \sim 10^{16} \text{ с}^{-1}$, что примерно соответствует диапазону видимого света и намного превышает частоту интересующих нас радиоволн. Следовательно, с большим запасом выполняется неравенство $\omega \ll \omega_0$, и нейтральный газ почти не влияет на распространение радиоволн. Даже в нижних, самых плотных слоях атмосферы коэффициент преломления n отличается от единицы лишь в четвертом знаке, в космосе же влияние нейтрального газа еще намного слабее. Оно проявляется только косвенным образом через столкновения «свободных» (плазменных) электронов с нейтралами. Столкновения приводят к затуханию колебаний, но в нашем случае его можно не учитывать.