

УДК 550.388.2

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ПОПЕРЕЧНЫХ РЕЗОНАНСОВ ПОЛОСТИ ЗЕМЛЯ—ИОНОСФЕРА

*А. П. Николаенко, В. А. Рафальский*

Методом нормальных волн решена задача о возбуждении поперечных резонансов плоского промежутка между Землей и ионосферой вертикальными грозowymi разрядами. Используются две модели: 1) резко ограниченная снизу однородная ионосфера и 2) ионосфера с экспоненциальным профилем проводимости. Для набора дистанций источник — наблюдатель в диапазоне частот 1—8  $\text{кГц}$  рассчитаны спектры вертикальной электрической и горизонтальной магнитной компонент радиоволны. Особенности спектров в зависимости от частоты объясняются как результат взаимодействия нормальных волн.

Замкнутая сферическая полость, ограниченная поверхностью Земли и нижней границей ионосферы, образует естественный объемный резонатор. В настоящей работе мы рассмотрим электрические (ТМ) колебания, возбуждаемые в полости вертикальными грозowymi разрядами.

Поскольку полость Земля — ионосфера трехмерна, ее собственные частоты имеют три индекса, или квантовых числа:  $p$ ,  $m$ ,  $n$ . Индекс  $p = 0, 1, 2, \dots$  — поперечное квантовое число, которое показывает, сколько полуволн укладывается вдоль высоты резонатора,  $n$  — зональное квантовое число, показывающее число длин волн, укладываемых вдоль окружности Земного шара,  $m$  — азимутальное квантовое число (см. [1]).

Если  $p = 0$  (это означает, что электромагнитное поле в узком зазоре между Землей и ионосферой от высоты практически не зависит), то резонансы возникают за счет того, что радиоволны, оббежав вокруг Земли, приобретают фазовый набег, кратный  $2\pi$ . Эти резонансы были предсказаны Шуманом в 1951 г., а в 1960 г. обнаружены Бальсером и Вагнером [2, 3]. Собственные частоты при  $p = 0$  попадают в диапазон от единиц до десятков герц, и поэтому резонансы называют глобальными сверхнизкочастотными (СНЧ) или шумановскими. Азимутальное квантовое число  $m$  в однородном резонаторе на величину собственных частот не влияет (наблюдается вырождение) и поэтому нами в дальнейшем не рассматривается.

При  $p \neq 0$  зональное квантовое число  $n$  почти не влияет на собственные частоты [4]. Этот факт связан с тем, что длина экватора  $L$  значительно больше вертикального размера резонатора  $h$ . Действительно, квадрат собственного числа примерно равен сумме  $(p\pi/h)^2$  и  $(n\pi/L)^2$ , а так как  $L \gg h$ , зональное квантовое число из рассмотрения можно исключить. Физически это означает, что в тонком диэлектрическом слое между Землей и ионосферой при  $p \neq 0$  волнами, оббежавшими вокруг Земли, можно пренебрегать.

Таким образом, для расчетов можно пользоваться плоской моделью резонатора, сформированного с одной стороны идеально проводящей Землей, а с другой — нижней ионосферой. Для реальных высот  $h \in 60, 100 \text{ км}$  основная частота поперечных резонаторов попадает

в диапазон единиц килогерц. Строго говоря, наличие поперечных резонансов хорошо известно, так как без этого явления не существовали бы нормальные волны или моды [5-7]. Тем не менее до настоящего времени прямого исследования энергетического спектра вынужденных поперечных резонансных колебаний не было\*.

Целью настоящей работы является расчет энергетического спектра вынужденных естественных поперечных резонансов. Авторы надеются, что им удастся пробудить интерес экспериментаторов к этому еще не изученному явлению, которое несомненно несет информацию о нижней ионосфере.

Будем считать промежуток Земля — ионосфера плоским, поверхность Земли — идеально проводящей, а ионосферу — плоскостной средой. Мы рассмотрим две модели ионосферы — однородную, резко ограниченную на высоте  $h = 60$  км, и модель с экспоненциальным профилем проводимости:

$$\sigma(z) = \begin{cases} \sigma_0 e^{\beta(z-h)} & \text{при } z > h \\ 0 & \text{при } z < h \end{cases},$$

где  $\sigma_0 = 10^{-6}$  См/м,  $\beta^{-1} = 3,25$  км, а ось  $z$  направлена по вертикали вверх. Источник колебаний — молнию — будем считать вертикальным электрическим диполем, расположенным на уровне Земли. Спектр источника — равномерный (импульс тока описывается функцией Дирака  $\delta(t)$ ).

Вертикальное электрическое и горизонтальное магнитное поля на нижней границе в плоском волноводе представляются в виде следующих сумм [5-7]:

$$E_z = \frac{\pi i k^2}{h} \sum_{p=0}^{\infty} \delta_p S_p^2 H_0^{(1)}(kr S_p); \quad (1)$$

$$H_\varphi = \frac{\pi k^2}{h} W_0 \sum_{p=0}^{\infty} \delta_p S_p H_1^{(1)}(kr S_p), \quad (2)$$

где  $k = \omega/c$  — волновое число,  $h$  — высота волновода,  $W_0 = 120\pi$  Ом — волновое сопротивление вакуума,  $r$  — расстояние от наблюдателя до молнии в цилиндрической системе координат, связанной с источником,

$$\delta_p = \begin{cases} 1 & \text{при } p = 0 \\ 2 & \text{при } p \neq 0 \end{cases},$$

$H_0^{(1)}(x)$  и  $H_1^{(1)}(x)$  — функции Ханкеля первого рода,  $S_p = \sin \theta_p$  — корни дисперсионного уравнения

$$1 + V(\theta) e^{2ikh \cos \theta} = 0, \quad (3)$$

$V(\theta)$  — коэффициент отражения от верхней границы, зависящий от угла падения  $\theta$  волны на слой. Коэффициент отражения от нижней границы принят равным единице.

В случае однородной ионосферы с коэффициентом преломления  $N \gg 1$  уравнение (3) можно решить по методу последовательных приближений [7]. Тогда в первом приближении получим

$$S_p^2 = 1 - (u_p/kh)^2, \quad u_0 = \sqrt{kh/iN}, \quad u_p = \pi p + kh/ip\pi N, \quad p = 1, 2, \dots$$

\* Исключение составляют результаты экспериментальных исследований НИРФИ по нелинейному воздействию мощного модулированного КВ излучения на ионосферу [8]. В спектрах комбинационных частот обнаружены максимумы, которые, возможно, обусловлены поперечными резонансами [9].

Ступенчатая модель E верт

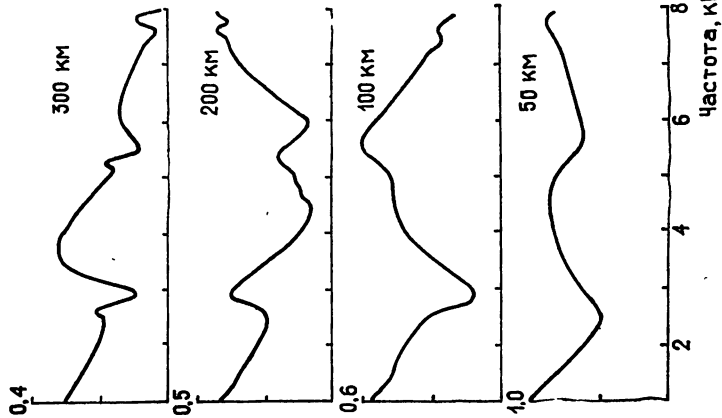


Рис. 1.

Экспоненциальная модель E верт

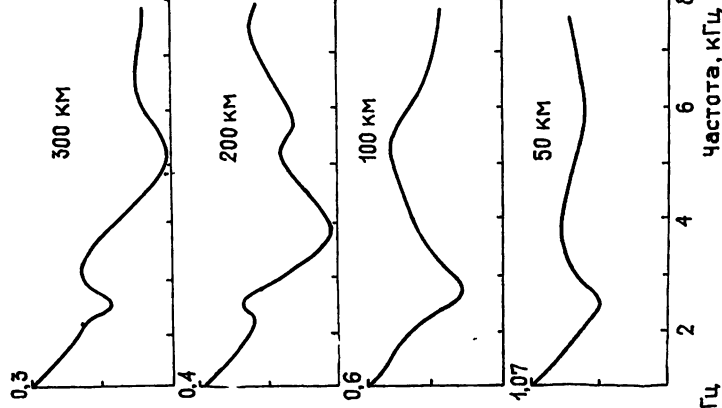


Рис. 2.

Ступенчатая модель H гор

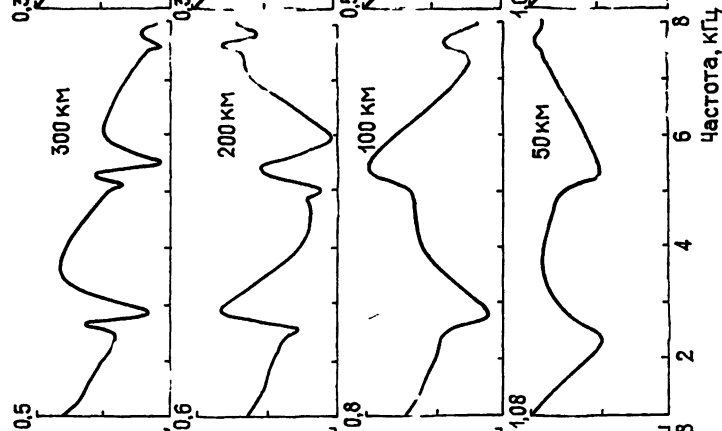


Рис. 3.

Экспоненциальная модель H гор

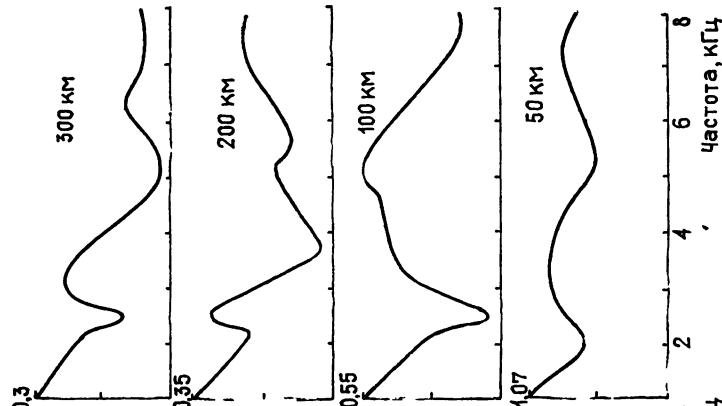


Рис. 4.

Неоднородной по высоте ионосфере можно приписать эффективный коэффициент преломления  $N_{эфф}$ , зависящий от угла падения и поверхностного импеданса ионосферы  $W$ ,

$$N_{эфф} = (W_0/W)^2 - \sin^2\theta. \quad (4)$$

В случае экспоненциальной зависимости показателя преломления от высоты для поверхностного импеданса ионосферы можно получить [10]

$$\frac{W}{W_0} = \frac{\nu - 1}{N^2} \frac{\beta}{2ik} - \frac{i}{N} \frac{H_{\nu-1}^{(1)}(2kN/\beta)}{H_{\nu}^{(1)}(2kN/\beta)}, \quad (5)$$

где

$$\nu = \sqrt{1 - (2k\beta^{-1}\sin\theta)^2}. \quad (6)$$

С помощью (1)–(6) был проведен расчет спектров вертикального электрического и горизонтального магнитного полей на расстояниях  $r = 50, 100, 200, 300$  км от источника. Суммирование по нормальным волнам в (1), (2) могло вестись до 14 членов, причем оно прекращалось, если амплитуда очередного типа не превышала 1% от общей суммы. Множитель, пропорциональный частоте, перед знаком сумм в (1) и (2) нами не учитывался.

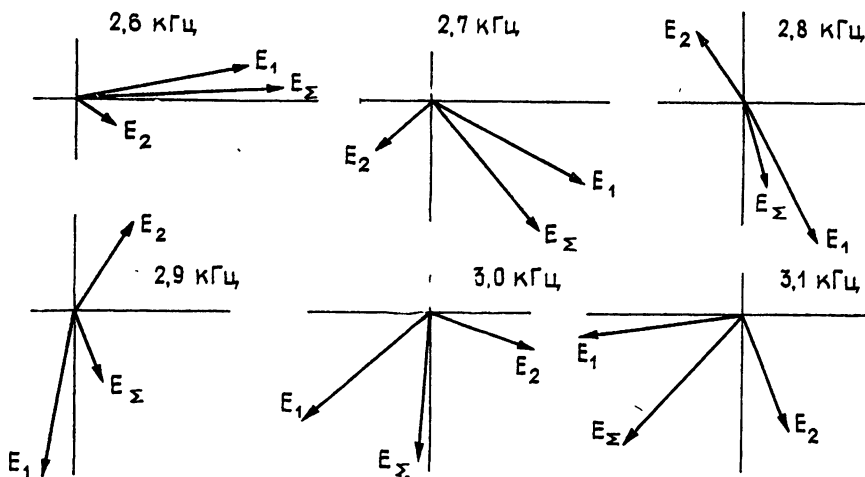


Рис. 5.

Результаты расчетов вертикальной электрической и горизонтальной магнитной компонент представлены на рис. 1–4. Здесь по горизонтали отложена частота в килогерцах. Один набор графиков соответствует модели резко ограниченной снизу ионосферы, а другой — экспоненциальному профилю проводимости. Как видно, расчетные зависимости спектров поля от частоты имеют резонансный характер. В начальной части график плавно спадает. Здесь распространяющейся является только нулевая волна ( $p=0$ ), амплитуда которой падает с ростом частоты, что вызвано ростом численного расстояния  $D = kr$ . Уменьшение напряженности поля связано с цилиндричностью волны и потерями в ионосфере. На частоте 2,5 кГц становится распространяющимся еще один тип волны — первый. Его амплитуда сначала растет за счет удаления от критической частоты, затем начинает убывать по тем же причинам, что и для нулевого мода. Фаза первого типа растет с увеличением частоты быстрее, чем фаза нулевой волны. Это вызвано тем, что кроме набега, пропорционального частоте (как и у нулевого типа), уве-

личивается продольная составляющая волнового вектора за счет роста  $S_1$ . Поэтому разность фаз волн первого и второго типов сначала изменяется быстро, а затем медленнее и устанавливается на некотором постоянном значении.

Описанный процесс иллюстрируется векторными диаграммами рис. 5. В зависимости от взаимной фазировки волн соответствующих типов, определяемой расстоянием источник — приемник и параметрами моделей, частотная характеристика резонанса может иметь разную форму. Резонанс может начинаться максимумом или минимумом поля, либо даже равномерным участком. Аналогичные явления наблюдаются и в области частот 5; 7,5; 10  $\kappa\text{Гц}$ , где «зарождаются» резонансы более высоких типов.

Рассматривая источник с равномерным спектром, мы игнорировали характеристики излучения реальных молний, которые могут быть весьма сложными, особенно для многократных разрядов. Это обстоятельство способно существенно повлиять на форму наблюдаемых спектров. По нашему мнению, эксперимент по наблюдению поперечных резонансов надо ставить так, чтобы исключить влияние формы спектра источника. Необходимо измерять величины, спектр которых не зависит от спектра молний. Такой величиной, например, является волновой импеданс промежутка Земля — ионосфера, равный  $|W_{\text{в}}| = |E_z/H_{\phi}|$ , или величина  $P = (|E_z| - W_0|H_{\phi}|)(|E_z| + W_0|H_{\phi}|)^{-1}$ , которая в области резонансов, как показал расчет, имеет более резкие изменения, чем вертикальная электрическая и горизонтальная магнитная компоненты полей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Блюх П. В., Николаенко А. П., Филиппов Ю. Ф. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля—ионосфера.— Киев: Наукова Думка, 1977.
2. Schumann W. O.— Z. Naturforsch., 1952, 7a, s. 149
3. Balseg M., Wagner C.— Nature, 1960, 188, p. 638.
4. Блюх П. В., Галюк Ю. П., Гюннинен Э. М. и др.— Изв. вузов — Радиофизика, 1977, 20, № 4, с. 500.
5. Wait J. R. Electromagnetic waves in stratified media.— Perg. Press, 1962.
6. Макаров Г. И., Новиков В. В. Проблемы дифракции и распространения волн.— Л.: ЛГУ, 1968, вып. 7, с. 19.
7. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах.— М.: АН СССР, 1957.
8. Беллюстин Н. С., Докучаев В. П., Поляков С. В. и др.— Изв. вузов— Радиофизика, 1975, 18, № 9, с. 1323.
9. Поляков С. В. Диссертация. Горький, 1982.
10. Galejs J. Terrestrial propagation of long electromagnetic waves.— Perg. Press, 1972.

Институт радиофизики и электроники  
АН УССР

Поступила в редакцию  
15 ноября 1982 г.

#### POWER SPECTRA OF TRANSVERSE RESONANCES IN THE EARTH—IONOSPHERE

*A. P. Nikolaenko, V. A. Rafal'shij*

The excitation of transverse ELF resonances in the planar Earth — ionosphere waveguide by the vertical lightning discharges is considered. The modal solutions are represented in the framework of two models: sharply bounded homogeneous ionosphere and that one with exponential height profile of conductivity. In the frequency range from 1 to 8 kHz for a set of source—observer distances the spectra of vertical electric and horizontal magnetic field components are computed. Frequency dependence of the spectra is interpreted as a result of the modes interaction.