

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ  
И ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ**

УДК 621.371.25

**ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ВОЛНОВОДЕ ЗЕМЛЯ —  
ИОНОСФЕРА НИЗКОЧАСТОТНЫМИ ИОНОСФЕРНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ**

А. Е. Резников, А. И. Сухоручков

В настоящем сообщении рассматривается вопрос о генерации электромагнитных волн ОНЧ диапазона горизонтальным магнитным диполем, расположенным в высокоширотной неоднородной анизотропной ионосфере на высотах  $z_s \lesssim 300$  км. Различные аспекты данной проблемы впервые изучались в работах [1-4]; в [5-7] были развиты методы численного расчета полей на Земле от источников, расположенных в верхней ионосфере. Цель данной работы — получить простые аналитические выражения для поля излучения диполя на Земле в ближней и дальней зонах.

Используется плоскостная модель волновода с идеально проводящей Землей. Ионосфера в некотором переходном слое  $h_1 < z < h_2$  считается изотропной средой, показатель преломления которой изменяется с высотой по экспоненциальному закону  $n(z) = n_1 \exp[(z-h_1)/L]$  [8-10], где  $L$  — характерный масштаб неоднородности,  $h_1$  — высота нижней границы ионосферы,  $n_1$  — значение показателя преломления при  $z=h_1$ . Последнее предполагается комплексным ( $|n_1|$  близко к единице) и определяется (так же как и значение  $h_1$ ) исходя из экспоненциальных зависимостей концентрации электронов  $N_e$  и частоты соударений  $\nu$  в нижней ионосфере в дневных условиях. При  $z > h_2$  ионосфера считается анизотропной, с показателем преломления  $n^2(z) \simeq |g| = n_z^2 + \beta(z-h_2)$ , отвечающую распространяющейся необыкновенной волне для рассматриваемого диапазона частот  $\omega_{vi} \ll \omega \ll \omega_{ve}$  ( $|g| = \omega_{pe}^2 / \omega \omega_{ve}$ ,  $\omega_{vi}$  и  $\omega_{ve}$  — гирочастоты ионов и электронов,  $\omega_{pe}$  — плазменная частота). Источник — элементарный горизонтальный магнитный диполь с моментом  $P_m = \{P_m, 0, 0\}$  — расположен в точке  $x_s = \{0, 0, z_s\}$ ,  $h_2 < z_s \lesssim 300$  км (используется декартова система координат с осью Oz, перпендикулярной плоскости Земли)\*.

Настоящая модель в целом хорошо описывает зависимость  $n(z)$ , за исключением небольшого слоя при выходе в вакуум ( $z \rightarrow h_1$ ) шириной  $\Delta z \sim L$ , и, таким образом, становится неприменимой при нарушении сильного неравенства  $\lambda_1 \gg L$  ( $\lambda_1 = \lambda_0 / \text{Re } n_1$ ,  $\lambda_0$  — длина волны в вакууме) [8]. По этой причине проводимое рассмотрение справедливо для частот  $f \lesssim 5$  кГц.

Исходные уравнения Максвелла решались [11] для каждой из трех областей ( $0 < z < h_1$ ,  $h_1 < z < h_2$  и  $z > h_2$ ) с последующим сшиванием решений на границах  $z=h_1$  и  $z=h_2$  (с помощью условий непрерывности тангенциальных компонент  $E_\tau$  и  $H_\tau$ ), а также использованием граничных условий при  $z=0$  и условия излучения при  $z \rightarrow \infty$ .

Дальнее поле источника ( $k_0 r \gg 1$ ,  $r \gg h_1$ ) определяется вкладом E-волны, причём для частот  $f \lesssim c/2h_1$  основной вклад даёт главная волна. Для последней значение волнового числа  $k_{\perp 0}$ , определяющего фазовую скорость  $v_{ph_0} = c/\text{Re}(k_{\perp 0}/k_0)$  и коэффициент затухания  $\alpha = k_0 \text{Im}(k_{\perp 0}/k_0)$  в волноводе, приближенно записывается в виде

$$\begin{aligned} \text{Re} \left( \frac{k_{\perp 0}}{k_0} \right) &\simeq 1 - \frac{L}{2h_1} \left[ \ln \frac{k_0 |n_1| L}{2} + \gamma \right], \\ \text{Im} (k_{\perp 0}/k_0) &\simeq L/2h_1 \left( \pi/4 - \frac{1}{2|n_1|^2} \right), \end{aligned} \tag{1}$$

где  $\gamma = 0,577$  — постоянная Эйлера.

Поле на поверхности Земли описывается выражениями

$$E_z = \frac{\pi k_0^{5/2} S_0^{1/2} L \chi^{1/4} P_m n^2}{2h_1 D(\eta r)^{1/2}} \exp[ik_0 S_0 r + i(\Phi - \varphi + \pi/4)], \tag{2}$$

\* Поскольку вертикальный магнитный диполь, расположенный в ионосфере, неэффективен (см., например, [8]), мы ограничиваемся здесь рассмотрением излучения горизонтального магнитного диполя.

$$H_{\varphi} = \frac{\pi k_0^{5/2} L \chi^{1/4} P_m n_2}{2h_1 D (\eta S_0 r)^{1/2}} \exp [ik_0 S_0 r + i(\Phi - \varphi - 3\pi/4)].$$

Здесь введены следующие обозначения:  $\chi = 1 + (\alpha/n_2^2)(z_s - h_2)$ ,  $\Phi = (2/3)(k_0 n_2^3/\alpha) \times (\chi^{3/2} - 1)$ ,  $D = \delta \cos(\eta - \pi/4) - i \sin(\eta - \pi/4)$ ,  $\delta = (n_2/n_1) \exp[(h_1 - h_2)/L]$ ,  $S_0 = \text{Re}(k_{\perp c}/k_0) + i \text{Im}(k_{\perp c}/k_0)$ .

Ближнее поле источника определяется вкладом как  $E$ -, так и  $H$ -волны, и соответствующие выражения для компонент полей в данном случае могут быть представлены в виде

$$E_z = \frac{(2\pi)^{1/2} k_0^3 r L \chi^{1/4} P_m n_2}{D \eta^{1/2}} \exp[i(\Phi - \varphi + \pi/2)] \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\exp(ik_0 R_n)}{R_n^3} (1 - ik_0 R_n),$$

$$H_{\varphi} = \frac{(2\pi)^{1/2} k_0 L \chi^{1/4} P_m n_2}{D \eta^{1/2}} \exp[i(\Phi - \varphi)] \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\exp(ik_0 R_n)}{R_n^3} (1 - ik_0 R_n - k_0^2 R_n^2),$$

где  $R_n^2 = r^2 + h_n^2$ ,  $h_n = h_1(2n+1)$ .

Сделаем численные оценки амплитуд поля на Земле, возбуждаемого магнитным диполем с моментом  $P_m = 3 \cdot 10^5$  А·м<sup>2</sup> и расположенным на высоте  $z_s = 250$  км. Для  $f = 0,5$  кГц примем  $h_1 = 63$  км,  $h_2 = 80$  км,  $|n_1| \approx 1,5$ ,  $|\delta| \approx 0,9$ ,  $|\alpha| = 400$  км<sup>-2</sup>,  $L = 4,36$  км. Ограничиваясь в (3) первыми членами разложений, найдем максимальные значения  $|H_{\varphi}| \approx 1 \cdot 10^{-10}$  А/м (при  $r=0$ ) и  $|E_z| \approx 1 \cdot 10^{-2}$  мкВ/м (при  $r=45$  км). Для  $f = 4$  кГц из (3) получаем соответственно  $|H_{\varphi}| \approx 2 \cdot 10^{-9}$  А/м ( $r=0$ ) и  $|E_z| \approx 0,5$  мкВ/м ( $r=h_1$ ).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Galejs J. — Radio Sci., 1971, 6, № 1, p. 41.
2. Einaudi F., Wait J. R. — Can. J. Phys., 1971, 49, № 4, p. 447; № 11, p. 1452.
3. Беллюстин Н. С., Докучаев В. П., Поляков С. В., Тамойкин В. В. — Изв. вузов — Радиофизика, 1975, 18, № 9, с. 1323.
4. Беллюстин Н. С., Поляков С. В. — Изв. вузов — Радиофизика, 1977, 20, № 1, с. 87.
5. Rappert R. A. — Radio Sci., 1973, 6, № 6, p. 535.
6. Лукин Д. С., Молчанов О. А., Пресняков В. Б., Савченко П. П. Препринт ИЗМИРАН № 59. — М., 1984.
7. Рыбачек С. Т. — Изв. вузов — Радиофизика, 1985, 28, № 6, с. 703.
8. Котик Д. С., Поляков С. В., Яшнов В. А. — Изв. вузов — Радиофизика, 1978, 21, № 7, с. 938.
9. Котик Д. С., Поляков С. В., Рапопорт В. О., Тамойкин В. В. В кн.: Влияние мощного радиоизлучения на ионосферу. — Апатиты, 1979, с. 114.
10. Поляков С. В. В кн.: Влияние мощного радиоизлучения на ионосферу. — Апатиты, 1979, с. 134.
11. Резников А. Е., Сухоруков А. И. Препринт ИЗМИРАН № 2. — М., 1986.

Институт земного магнетизма,  
ионосферы и распространения радиоволн  
АН СССР

Поступила в редакцию  
24 марта 1986 г.

УДК 537.874.6:528.813:551.46

#### КРИТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В РАДИОТЕПЛОМ ИЗЛУЧЕНИИ НЕРОВНОЙ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНЫМ УГЛАМ НАБЛЮДЕНИЯ

В. Е. Гершензон, В. Г. Ирисов, Ю. Г. Трохимовский, В. С. Эткин

При решении задачи восстановления спектра волнения по данным радиометрии морской поверхности особый интерес представляют так называемые «критические явления» [1–3], которые возникают в тепловом излучении периодически неровной поверхности при определенных условиях. В данной работе исследуется излучательная способность такой поверхности в зависимости от азимутального угла наблюдения, что помогает объяснить некоторые поляризационные и азимутальные эффекты в радиотепловом излучении морской поверхности. Проведенный лабораторный эксперимент подтверждает результаты теоретических расчетов.