

А. К. Сараев, П. М. Косткин

СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ СНЧ-РАДИОУСТАНОВКИ

Новым перспективным направлением глубинной электроразведки является использование в качестве источника электромагнитного поля сверхнизкочастотной (СНЧ) радиоустановки "Зевс". СНЧ-радиоустановка расположена на севере Кольского полуострова. Она состоит из генератора гармонически изменяющегося тока и горизонтально расположенной антенны длиной около 60 км, заземленной на концах и ориентированной в широтном направлении. Рабочие частоты могут меняться от десятков до сотен герц. Дальнейшее действие составляет около 10000 км. В обычном режиме СНЧ-радиоустановка работает на одной из частот указанного диапазона, которая может использоваться для электромагнитного профилирования или мониторинга сейсмической активности. Для исследований методом частотных зондирований необходима предварительная подготовка, включение источника на разных частотах по расписанию и проведение измерений в согласованные интервалы времени.

Данный источник может использоваться непосредственно для проведения электромагнитных зондирований и профилирования при решении геолого-геофизических задач. Его применение особенно актуально в тех случаях, когда необходима высокая точность измерений (мониторинг сейсмической активности [1], картирование слабоконтрастных по удельному электрическому сопротивлению массивов горных пород). В неблагоприятных условиях для методов, основанных на использовании естественных электромагнитных полей (при значительном уровне промышленных помех, а также в высоких широтах при существенном влиянии ионосферных возмущений), измерения полей СНЧ-радиоустановки позволяют получать более надежные данные.

СНЧ-радиоустановка также может применяться при получении опорных данных для интерпретации результатов других методов, например метода аудиоманнитотеллурического зондирования [2], метода электромагнитного профилирования на промышленной частоте 50 Гц [3]. Уверенная интерпретация результатов этих методов возможна при допустимости аппроксимации исследуемого электромагнитного поля плоской вертикально падающей волной. В качестве критериев используются сопоставления получаемых результатов с данными измерений полей СНЧ-радиоустановки, выполненные при учете структуры полей источников и неоднородного строения среды.

Для эффективного применения СНЧ-радиоустановки при решении геолого-геофизических задач, прогнозировании землетрясений и для комплексирования с другими электроразведочными методами необходимо изучить закономерности изменения ее электромагнитного поля. При проведении расчетов и изучении структуры электромагнитного поля источник такого типа может быть аппроксимирован горизонтальным электрическим диполем. На относительно небольшом удалении от источника необходимо учитывать длину антенной системы и рассматривать поле кабеля конечной длины.

Структуры нормальных электромагнитных полей (над однородным изотропным полупространством) горизонтального электрического диполя и кабеля в квазистационарном приближении достаточно хорошо изучены [4]. Вместе с тем использовать полученные ранее результаты для объяснения особенностей изменения электромаг-

нитного поля СНЧ-радиоустановки не удается. На больших расстояниях от данного источника структура поля существенно отличается от имеющихся представлений о полях в дальней зоне горизонтального электрического диполя [4–7].

Ранее при анализе нормального поля горизонтального электрического диполя рассматривались результаты расчетов для полупространства в квазистационарном приближении по низкочастотным формулам без учета токов смещения в воздухе (полагалось, что волновое число воздуха $k_0 = 0$). Такой подход к решению задачи был оправдан при использовании низкочастотных электроразведочных установок с относительно небольшим расстоянием от источника до точки наблюдения. СНЧ-радиоустановка является мощным источником, и ее поле может быть измерено на значительном удалении (сотни–тысячи километров). В этом случае расстояния до точек наблюдения превышают высоту ионосферы, и при анализе закономерностей изменения составляющих поля возникает необходимость учета ее влияния. Кроме того, при больших расстояниях от источника до точек наблюдения даже для сверхнизких частот (десятки–сотни герц) следует ожидать увеличения влияния токов смещения в воздухе. Поэтому при проведении расчетов полей СНЧ-радиоустановки было использовано решение задачи о поле диполя, помещенного на нижнюю границу волновода земля–ионосфера, с учетом токов смещения в воздухе и электрических свойств земли и ионосферы.

Выражения составляющих электромагнитного поля горизонтального электрического диполя в волноводе земля–ионосфера

Расчетам сверхнизкочастотных электромагнитных полей посвящен ряд публикаций радиофизического профиля, нацеленных на решение задач распространения радиоволн и связи [8–14]. В настоящее время при исследовании закономерностей распространения радиоволн СНЧ-радиоустановки рассматривается сферическая модель волновода и учитываются особенности строения ионосферы (задается профиль изменения с высотой электронной концентрации и, соответственно, свойств ионосферы), а также сезонные и суточные изменения ее параметров. Вместе с тем в этих работах принята дипольная аппроксимация источника и вычисления полей производятся по асимптотическим формулам, пригодным для использования на некотором, достаточно неопределенном расстоянии от источника.

При решении геолого-геофизических задач в различных районах, в том числе и на Кольском п-ве в непосредственной близости от СНЧ-радиоустановки, необходимо проведение расчетов, как для дальней, так и для ближней зон рассматриваемого источника с учетом его реальных параметров. С другой стороны, в указанных выше работах наиболее детально анализировались составляющие поля, представляющие интерес с точки зрения решения задач связи, в первую очередь вертикальная составляющая электрического поля E_z . Она характеризуется минимальным затуханием при распространении в волноводе земля–ионосфера, однако, являясь менее зависимой от параметров земли и ионосферы, она менее информативна. Более информативными могут быть другие составляющие электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки, и необходимо детально изучить закономерности их изменения в зависимости от свойств и структурных особенностей земли.

При расчетах составляющих электромагнитного поля диполя и кабеля конечной длины в волноводе земля–ионосфера использовались результаты исследований П. М. Косткина и О. М. Морозовой, выполненных ранее для решения задач радиоволнового просвечивания (РВП). Были получены строгие решения волнового уравнения в трехслойной среде с учетом токов смещения и электромагнитных па-

раметров каждого слоя (удельного электрического сопротивления, диэлектрической и магнитной проницаемостей), разработаны программные средства для вычисления составляющих поля электрического и магнитного диполей, как ортогональных, так и параллельных границам раздела сред. При этом источник и приемник могут находиться в любой из трех сред. Использование полученных решений и разработанных программных средств для анализа закономерностей изменения полей в методе РВП рассмотрено в работе [15], а для анализа структуры электромагнитного поля вертикального электрического диполя в волноводе земля–ионосфера — в работе [16].

При анализе структуры электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки нами был принят подход, основанный на использовании модели ионосферы в виде полупространства и строгом решении задачи без упрощающих допущений о параметрах источника и свойствах среды. Принятая модель ионосферы для частот $\sim 1 - 10^5$ Гц характеризуется значениями эффективной высоты волновода 90 км в ночное время и 60 км в дневное [8]. Эффективное значение удельного электрического сопротивления ионосферы принято равным 10^5 Ом·м. Эта модель ионосферы при фиксированной частоте излучения адекватно характеризует структуру электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки, модель позволяет получить представления о характере изменения составляющих поля и объяснить результаты экспериментов как в непосредственной близости, так и на удалении от источника. Анализ данных из [8] показывает, что модель плоского волновода применима для рассматриваемых условий примерно до расстояния 3000 км от источника. Для вычисления уровней полей СНЧ-радиоустановки в точке измерений с учетом сезонных и суточных изменений параметров ионосферы необходимо использовать более сложную, с изменяющимися свойствами модель ионосферы, что реализовано в работах радиофизического профиля.

Настоящая статья является первой из планируемого авторами ряда публикаций, в которых будут подробно рассмотрены особенности структуры электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки применительно к решению геолого-геофизических задач и прогноза землетрясений. По этой причине в статье приводятся полные выражения для составляющих электромагнитного поля горизонтального электрического диполя, используемые в разработанных программах для расчетов полей диполя и кабеля конечной длины в волноводе земля–ионосфера, а также достаточно детально рассмотрена методика численных расчетов.

Для вычисления составляющих электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки горизонтальный электрический диполь, находящийся внутри среднего слоя трехслойной среды, необходимо было поместить на нижнюю границу слоя. В этом случае в полученных ранее выражениях для некоторых составляющих поля появлялись расходящиеся интегралы. Путем преобразований эти расходимости удалось убрать, и окончательные выражения содержат только сходящиеся интегралы.

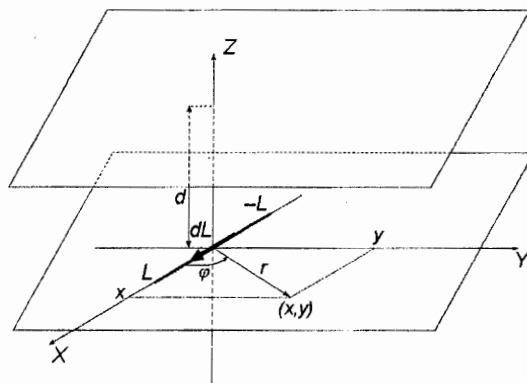


Рис. 1. Модель, использованная при расчетах электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки.

Модель, использованная при расчетах электромагнитного поля СНЧ-радиостановки, показана на рис. 1. В этой модели однородный пласт (воздух) мощностью d находится между двумя однородными полупространствами — землей и ионосферой. Горизонтальный электрический диполь расположен в начале цилиндрической (r, φ, z) и прямоугольной (x, y, z) систем координат на нижней границе волновода земля—ионосфера и ориентирован по оси x . В каждой из трех сред, воздухе — “0”, земле — “1” и ионосфере — “2”, задаются удельные электрические сопротивления (ρ) и относительные диэлектрические проницаемости (ϵ), а относительные магнитные проницаемости (μ) приняты равными единице для всех трех сред. Закон изменения электромагнитного поля во времени принят в виде $e^{i\omega t}$.

Выражения составляющих электромагнитного поля горизонтального электрического диполя для среды “0” в цилиндрической системе координат таковы: составляющие поля над полупространством (нормального поля)

$$\begin{aligned}
 H_{r\text{норм}} &= 2\beta \sin \varphi (k_0^2 - k_1^2) \left\{ \int_0^\infty B_2 J_0(\lambda r) d\lambda - \frac{1}{2r} \int_0^\infty B_1 J_1(\lambda r) \lambda d\lambda \right\}, \\
 H_{\varphi\text{норм}} &= 2\beta \cos \varphi (k_0^2 - k_1^2) \left\{ \frac{k_0^2 k_1^2}{k_0^2 + k_1^2} \int_0^\infty B_1 J_0(\lambda r) d\lambda + \frac{1}{r} \int_0^\infty B_1 J_1(\lambda r) \lambda d\lambda \right\}, \\
 H_{z\text{норм}} &= 2\beta \sin \varphi \frac{1}{(k_0^2 - k_1^2)r} (P_1 - P_0), \\
 E_{r\text{норм}} &= 2\beta \cos \varphi \frac{i\omega}{k_0^2 + k_1^2} \left\{ 2M_0 + (k_0^2 - k_1^2) \left[k_1^2 \int_0^\infty n_0 B_1 J_0(\lambda r) d\lambda + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{k_0^2}{r} \int_0^\infty \frac{\lambda}{n_0} B_1 J_1(\lambda r) d\lambda \right] \right\}, \\
 E_{\varphi\text{норм}} &= 2\beta \sin \varphi \frac{i\omega}{k_0^2 + k_1^2} \left\{ -\frac{k_1^2}{k_0^2 - k_1^2} M_0 + \frac{k_0^2 + k_1^2}{k_0^2 - k_1^2} M_1 + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{k_0^2 (k_0^2 - k_1^2)}{r} \int_0^\infty \frac{\lambda}{n_0} B_1 J_1(\lambda r) d\lambda \right\}, \\
 E_{z\text{норм}} &= -2\beta \cos \varphi \frac{i\omega}{k_0^2 + k_1^2} k_1^2 (k_0^2 - k_1^2) \int_0^\infty B_1 J_1(\lambda r) \lambda d\lambda,
 \end{aligned} \tag{1}$$

здесь $\beta = \mu_0 I d L / (4\pi)$ — момент диполя, I — сила тока, dL — длина диполя; волновое число k_j в средах $j = 0, 1$ определяется выражением $k_j^2 = \mu_0 \omega (i\sigma_j - \epsilon_0 \epsilon_j \omega)$, где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота, σ_j — удельная электропроводность ($\sigma_j = 1/\rho_j$), $\epsilon_0 = 1/(36\pi \cdot 10^9)$ Ф/м — диэлектрическая проницаемость вакуума, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная проницаемость вакуума, J_ν — функции Бесселя первого рода порядка ν ;

$$\begin{aligned}
 B_1 &= \frac{\lambda}{(n_0 + n_1)(n_0 k_1^2 + n_1 k_0^2)}, & B_2 &= \frac{\lambda}{(n_0 + n_1)^2}, \\
 M_j &= \frac{k_j r + 1}{r^3} e^{-k_j r}, & P_j &= \frac{k_j^2 r^2 + 3k_j r + 3}{r^3} e^{-k_j r},
 \end{aligned}$$

$$\cos \varphi = \frac{x}{r}, \quad \sin \varphi = \frac{y}{r}, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad n_0 = \sqrt{\lambda^2 + k_0^2}, \quad n_1 = \sqrt{\lambda^2 + k_1^2};$$

составляющие поля в волноводе земля—ионосфера

$$H_r = H_{r\text{норм}} + \beta \sin \varphi \left\{ 4(k_0^2 - k_1^2) \int_0^\infty n_1 B_7 J_0(\lambda r) d\lambda - \frac{2(k_0^2 - k_1^2)}{r} \left[\int_0^\infty B_6 J_1(\lambda r) d\lambda + \int_0^\infty B_3 J_1(\lambda r) d\lambda + 2(k_0^2 - k_2^2) \int_0^\infty B_4 J_1(\lambda r) d\lambda \right] + \frac{8k_1^2(k_0^2 - k_2^2)}{r} \int_0^\infty B_5 J_1(\lambda r) \lambda^2 d\lambda \right\},$$

$$H_\varphi = H_{\varphi\text{норм}} - \beta \cos \varphi \left\{ 2(k_0^2 - k_1^2) \left[\int_0^\infty B_6 J_0(\lambda r) \lambda d\lambda + \int_0^\infty B_3 J_0(\lambda r) \lambda d\lambda + 2(k_0^2 - k_2^2) \int_0^\infty B_4 J_0(\lambda r) \lambda d\lambda \right] - 4(k_0^2 - k_2^2) \left[\int_0^\infty n_1 B_7 J_0(\lambda r) d\lambda + 2k_1^2 \int_0^\infty B_5 J_0(\lambda r) \lambda^3 d\lambda \right] - \frac{2(k_0^2 - k_1^2)}{r} \left[\int_0^\infty B_6 J_1(\lambda r) d\lambda + \int_0^\infty B_3 J_1(\lambda r) d\lambda + 2(k_0^2 - k_2^2) \int_0^\infty B_4 J_1(\lambda r) d\lambda \right] + \frac{8k_1^2(k_0^2 - k_2^2)}{r} \int_0^\infty B_5 J_1(\lambda r) \lambda^2 d\lambda \right\},$$

$$H_z = H_{z\text{норм}} + 4\beta \sin \varphi (k_0^2 - k_2^2) \int_0^\infty B_7 J_1(\lambda r) \lambda d\lambda,$$

$$E_r = E_{r\text{норм}} + 2\beta \cos \varphi \frac{i\omega}{k_0^2} \left\{ \frac{k_0^2 - k_1^2}{r} \left[\int_0^\infty n_0 B_3 J_1(\lambda r) d\lambda - \int_0^\infty n_0 B_6 J_1(\lambda r) d\lambda + 2(k_0^2 - k_2^2) \int_0^\infty n_0 B_4 J_1(\lambda r) d\lambda \right] - 2(k_0^2 - k_2^2) \left[2k_0^2 \int_0^\infty n_1 B_5 J_0(\lambda r) \lambda d\lambda + \int_0^\infty n_0^2 B_7 J_0(\lambda r) d\lambda \right] + (k_0^2 - k_1^2) \left[\int_0^\infty n_0 B_6 J_0(\lambda r) \lambda d\lambda - \int_0^\infty n_0 B_3 J_0(\lambda r) \lambda d\lambda - (k_0^2 - k_2^2) \int_0^\infty n_0 B_4 J_0(\lambda r) \lambda d\lambda \right] + \frac{2(k_0^2 - k_2^2)}{r} \left[2k_0^2 \int_0^\infty n_1 B_5 J_1(\lambda r) d\lambda + \int_0^\infty B_7 J_1(\lambda r) \lambda d\lambda \right] \right\},$$

$$E_\varphi = E_{\varphi\text{норм}} + 2\beta \sin \varphi \frac{i\omega}{k_0^2} \left\{ 2k_0^2 (k_0^2 - k_2^2) \int_0^\infty B_7 J_0(\lambda r) d\lambda - \right.$$

(2)

$$\begin{aligned}
& - \frac{k_0^2 - k_1^2}{r} \left[\int_0^\infty n_0 B_6 J_1(\lambda r) d\lambda - \int_0^\infty n_0 B_3 J_1(\lambda r) d\lambda - 2(k_0^2 - k_2^2) \int_0^\infty n_0 B_4 J_1(\lambda r) d\lambda \right] + \\
& + \frac{2(k_0^2 - k_2^2)}{r} \left[2k_0^2 \int_0^\infty n_1 B_5 J_1(\lambda r) d\lambda + \int_0^\infty B_7 J_1(\lambda r) \lambda d\lambda \right] \Bigg\}, \\
E_z = & E_{z\text{норм}} + 2\beta \cos \varphi \frac{i\omega}{k_0^2} \left\{ (k_0^2 - k_1^2) \left[\int_0^\infty B_6 J_1(\lambda r) \lambda^2 d\lambda + \int_0^\infty B_3 J_1(\lambda r) \lambda^2 d\lambda + \right. \right. \\
& + \left. \left. (k_0^2 - k_2^2) \int_0^\infty B_4 J_1(\lambda r) \lambda^2 d\lambda \right] - 2(k_0^2 - k_2^2) \left[2k_1^2 \int_0^\infty B_5 J_1(\lambda r) \lambda^2 d\lambda + \right. \right. \\
& \left. \left. + \int_0^\infty n_1 B_7 J_1(\lambda r) \lambda d\lambda \right] \right\};
\end{aligned}$$

входящие в (2) коэффициенты определяются формулами

$$\begin{aligned}
B_3 = \frac{n_0 k_1^2 - n_1 k_0^2}{n_0 k_1^2 + n_1 k_0^2} \frac{n_0 k_2^2 - n_2 k_0^2}{n_0 + n_1} \frac{\lambda^2}{C} e^{-n_0 d}, \quad B_4 = \frac{n_0 \lambda^2}{(n_0 + n_1)(n_0 + n_2)} \frac{n_0 k_2^2 + n_2 k_0^2}{CD}, \\
B_5 = \frac{n_0^2 \lambda^2}{CD}, \quad B_6 = \frac{n_0 k_2^2 - n_2 k_0^2}{CD} \lambda^2 A e^{-n_0 d}, \quad B_7 = \frac{n_0}{(n_0 + n_1)(n_0 + n_2)} \frac{\lambda}{D} e^{-n_0 d}, \\
n_2 = \sqrt{\lambda^2 + k_2^2}, \quad k_2^2 = \mu_0 \omega (\sigma_2 i - \varepsilon_0 \varepsilon_2 \omega), \quad A = (n_0 + n_2) e^{n_0 d} + (n_0 - n_2) e^{-n_0 d}, \\
C = (n_0 k_1^2 + n_1 k_0^2)(n_0 k_2^2 + n_2 k_0^2) e^{n_0 d} - (n_0 k_1^2 - n_1 k_0^2)(n_0 k_2^2 - n_2 k_0^2) e^{-n_0 d}, \\
D = (n_0 + n_1)(n_0 + n_2) e^{n_0 d} - (n_0 - n_1)(n_0 - n_2) e^{-n_0 d}.
\end{aligned}$$

Анализ приведенных выражений для составляющих электромагнитного поля горизонтального электрического диполя показывает, что волновое число воздуха k_0 входит в некоторые члены этих выражений в виде слагаемых в первой или второй степени совместно с волновыми числами земли k_1 или ионосферы k_2 , а также в виде множителя во внеинтегральные члены. Вкладом значений k_0 как слагаемых в рассматриваемых ситуациях можно пренебречь. При учете вклада значений k_0 , входящих в выражения для составляющих поля в виде множителя, необходимо рассматривать величину $k_0 r$, которой можно пренебречь только при малых расстояниях и надо учитывать при больших расстояниях от источника. Даже для сверхнизких частот (десятки — сотни герц) при очень больших расстояниях r (сотни — тысячи километров) вклад членов, содержащих множители $k_0 r$, должен быть весьма заметным. Аналогичные особенности отмечены ранее в работе [17] при рассмотрении поля вертикального магнитного диполя.

Расчетные формулы для составляющих электромагнитного поля кабеля конечной длины получены интегрированием по длине кабеля $2L$ (см. рис. 1) выражений для составляющих поля диполя. При этом составляющие поля диполя первоначально преобразовывались в прямоугольную систему координат. В разработанной программе предусмотрено вычисление модулей и фаз составляющих $E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$, полуосей a и b эллипсов поляризации электрического и магнитного полей и углов, характеризующих их ориентацию.

Особенности численных расчетов

Для вычисления интегралов, входящих в выражения составляющих поля (1) и (2), промежутков интегрирования $[0, \infty)$ разбивается на конечные промежутки, расположенные между соседними нулями функций Бесселя. Интегрирование на каждом промежутке проводится методом Гаусса по прямой квадратуре для n точек и уточняющей квадратуре для $2n + 1$ точек [18]. Для этого вычисляются интегральные суммы

$$S_n^{(j)} = \sum_{i=1}^n f_j(x_i^{(n)}) W_i^{(n)}, \quad S_{2n+1}^{(j)} = \sum_{i=1}^{2n+1} f_j(x_i^{(2n+1)}) W_i^{(2n+1)}, \quad (3)$$

где $S_n^{(j)}$ — интегральная сумма на конечном промежутке для j -го интеграла, вычисленная по прямой квадратуре, $S_{2n+1}^{(j)}$ — интегральная сумма на этом же промежутке для j -го интеграла, вычисленная по уточняющей квадратуре, $W_i^{(n)}$, $W_i^{(2n+1)}$ — веса метода Гаусса для прямой и уточняющей квадратур соответственно, $f_j(x_i)$ — значения j -й подынтегральной функции, вычисленной в i -м узле, который зависит от используемого метода интегрирования. После этого оценивается точность вычисления интеграла с помощью соотношений

$$\frac{|\operatorname{Re} S_{2n+1}^{(j)} - \operatorname{Re} S_n^{(j)}|}{|\operatorname{Re} S_{2n+1}^{(j)}|} < \varepsilon_1, \quad \frac{|\operatorname{Im} S_{2n+1}^{(j)} - \operatorname{Im} S_n^{(j)}|}{|\operatorname{Im} S_{2n+1}^{(j)}|} < \varepsilon_1, \quad \frac{|S_{2n+1}^{(j)} - S_n^{(j)}|}{|S_{2n+1}^{(j)}|} < \varepsilon_1, \quad (4)$$

где ε_1 — погрешность вычисления интегралов на промежутке $[0, \infty)$. Если соотношения (4) выполняются одновременно, то за значение j -го интеграла на данном промежутке интегрирования принимается величина $S_{2n+1}^{(j)}$. Если соотношения (4) одновременно не выполняются, то промежуток интегрирования делится пополам и процедура вычисления повторяется на каждом из новых промежутков. Процедура заканчивается, если на каждом промежутке для каждого интеграла выполняются соотношения (4). При этом если для какого-либо интеграла соотношения (4) на каком-то этапе вычислений выполняются, то при дальнейших дроблениях промежутка интегрирования он уже не вычисляется.

Оценка остатка интегрирования $R_k^{(j)}$ на промежутке $[0, \infty)$ проводится по двум схемам.

В первой схеме критерием окончания интегрирования служит соотношение

$$R_k^{(j)} = \frac{S_\varepsilon^{(j)}}{|S_k^{(j)}|} < \varepsilon_1, \quad (5)$$

где $S_\varepsilon^{(j)}$ — сумма модулей последних пяти частичных интегралов, $S_k^{(j)}$ — сумма частичных интегралов, вычисленных между k корнями соответствующих функций Бесселя. Если (5) выполняется, то за значение j -го интеграла на промежутке $[0, \infty)$ принимается величина $S_k^{(j)}$.

Во второй схеме используется метод Лонгмана [19, 20], применяющийся для вычисления интегралов от медленно сходящихся осциллирующих функций. Для оценки остатка интегрирования на промежутке $[0, \infty)$ используется соотношение [21]

$$R_k^{(j)} < \frac{\Delta_j^p}{2^{p+1}} < \varepsilon_1, \quad (6)$$

где Δ_j^p — p -я разность, построенная из $p + 1$ частичных интегралов, вычисленных между $p + 1$ корнями функций Бесселя. Если условие (6) для j -го интеграла выполняется, то, в соответствии со схемой Лонгмана, за значение j -го интеграла на промежутке $[0, \infty)$ принимается величина

$$S_L^{(j)} = S_k^{(j)} + \sum_{m=k+1}^p \frac{\Delta_j^m}{2^{m+1}},$$

где $k + 1$ — номер корня соответствующей функции Бесселя, начиная с которого вычисления производятся по схеме метода Лонгмана. Задаваемая относительная погрешность вычисления компонент поля (ε) равна 10^{-9} , а относительная погрешность вычисления интегралов (ε_1) принимается равной $0,1\varepsilon$.

При разработке программы было опробовано различное количество узлов интегрирования для метода Гаусса: 5 (11), 11 (23), 23 (47), 40 (81) (в скобках указано количество узлов, используемых для уточняющей квадратуры). Изменение количества узлов интегрирования после 11 (23) не приводило к изменениям в вычисленных значениях интегралов и компонент поля в пределах задаваемой относительной погрешности ε , поэтому это количество узлов было принято в качестве основного варианта вычислений. Вместе с тем в программе предусмотрена возможность изменения при необходимости этих параметров вычислений.

Анализ результатов расчетов

Расчеты составляющих электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки выполнены для следующих параметров: $f = 80$ Гц, длина кабеля $2L = 60$ км, сила тока 200 А, высота ионосферы $d = 90$ км, удельные сопротивления земли, воздуха и ионосферы соответственно $\rho_1 = 10^4$, $\rho_0 = 10^{13}$, $\rho_2 = 10^5$ Ом·м. Разработанные программные средства позволяют варьировать значения относительных диэлектрических проницаемостей во всех трех средах, однако при расчетах они были приняты равными единице (вклад значений ε в волновые числа k_1 и k_2 незначителен, а для воздуха $\varepsilon = 1$). В отдельных случаях использованы другие параметры, и это оговаривается в тексте.

На рис. 2 приведены результаты расчетов составляющих электрического поля E_x по профилям, ориентированным различным образом относительно источника. Два профиля направлены перпендикулярно кабелю. Один из них проходит через центр ($x/L = 0$), другой смещен в сторону от центра кабеля ($x/L = 10$). Третий профиль ориентирован вдоль кабеля ($y/L = 0$). Рассматриваются зависимости изменения E_x от расстояния до источника, выраженного в единицах L . Как видно из рисунка, на относительно небольших расстояниях кривые (3), полученные по результатам расчетов с использованием модели полупространства без учета влияния ионосферы и токов смещения в воздухе (далее будем называть их квазистационарными полями), совпадают с кривыми, рассчитанными с учетом влияния токов смещения (2), а также с учетом токов смещения и ионосферы (1). Поэтому на относительно небольшом расстоянии структура электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки может быть охарактеризована результатами расчетов в квазистационарном приближении. При удалении от источника для расчетов составляющих поля необходимо использовать решение задачи с учетом влияния ионосферы и токов смещения в воздухе (будем называть их полями в волноводе).

Анализ приведенных на рис. 2 кривых показывает, что для принятых параметров модели и источника учет токов смещения в воздухе при расчетах составляющей E_x

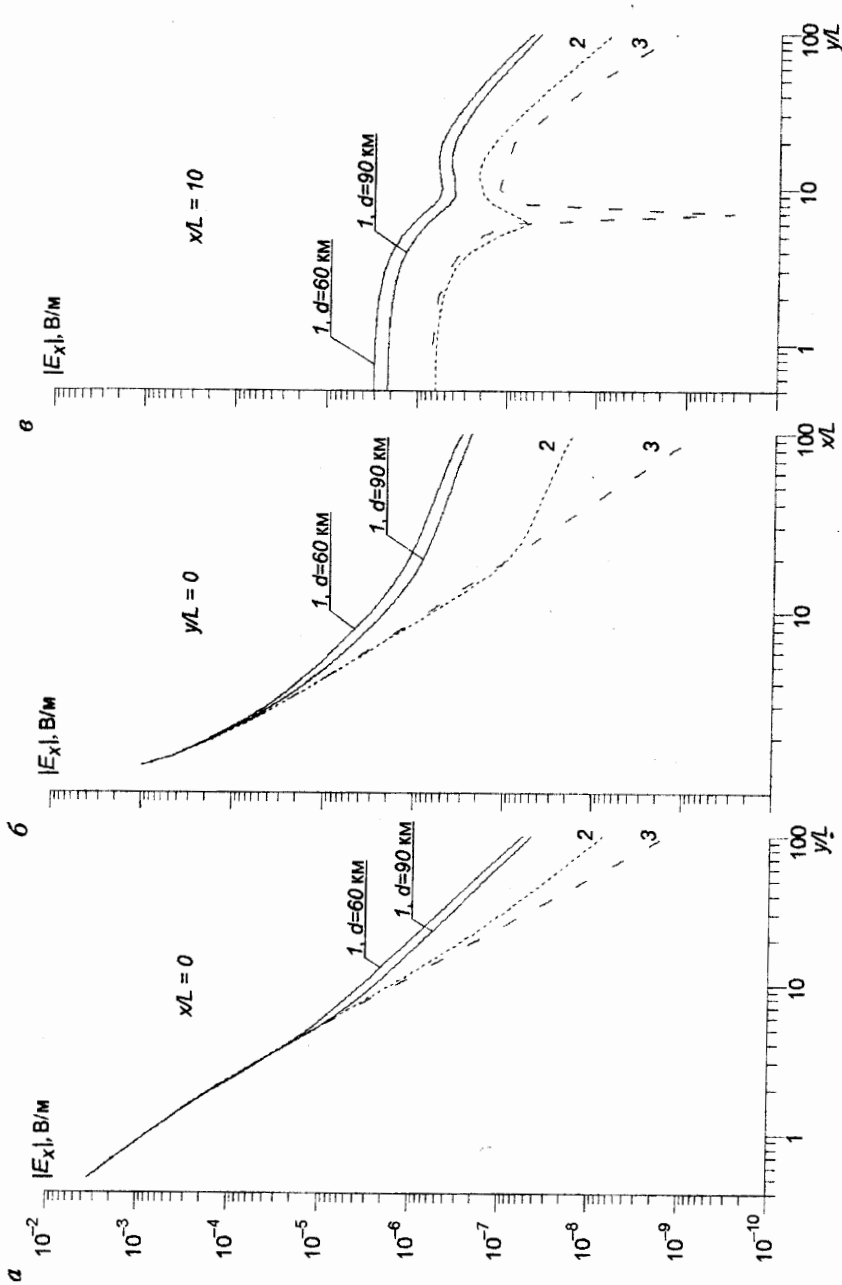


Рис. 2. Зависимости модуля $|E_x|$ от расстояния до источника по профилям $x/L = 0$ (а), $y/L = 0$ (б) и $x/L = 10$ (в).

1 — поле в волноводе; 2 — расчеты без учета влияния ионосферы; 3 — квазистационарное поле; d — высота волновода.

необходим начиная с расстояний 300 км в экваториальной зоне и 600 км вдоль кабеля, а влияние ионосферы следует учитывать начиная с расстояния 100 км вдоль кабеля и 200 км в экваториальной зоне кабеля. Здесь и далее оценки приведены для 10 % отличий соответствующих значений составляющих поля.

Сопоставление результатов расчетов полей в волноводе для кабеля и диполя позволило установить, что начиная с расстояний более 100 км по оси y и более 150 км по оси x может использоваться аппроксимация антенной системы вместо кабеля диполем. Далее, рассматривая структуру поля СНЧ-радиоустановки, будем говорить о поле кабеля, так как расстояния для удобства анализа выражены в единицах полудлины кабеля L .

Влияние токов смещения в воздухе и ионосферы приводит также к изменению характера графика составляющей E_x по профилю $x/L = 10$. При этом суммарное влияние указанных факторов приводит к смещению зоны минимальных значений E_x , по сравнению со случаем квазистационарного поля, в сторону более высоких величин y/L , что соответствует приближению этой области к экваториальной зоне кабеля. Кроме того, для поля в волноводе характерны сглаженные значения E_x в области минимума.

Как следует из рис. 2, уменьшение высоты ионосферы до 60 км приводит к увеличению амплитуды составляющей E_x примерно на 80 % по отношению к амплитуде сигнала при $d = 90$ км. Качественно это объясняется усилением волноводного эффекта при уменьшении высоты волновода.

При учете токов смещения и ионосферы существенным образом меняется диаграмма направленности данного источника. Для случая квазистационарного поля составляющие E_x на большом удалении в экваториальной зоне кабеля в два раза превосходят соответствующие значения на оси источника [4-7]. Наоборот, поле E_x в волноводе, как следует из рис. 2, начиная с расстояния 600 км по направлению вдоль кабеля превышает соответствующие значения в экваториальной зоне (примерно в пять раз на расстоянии 3000 км). Эти особенности диаграммы направленности СНЧ-радиоустановки подтверждаются данными экспериментов.

Приведенные материалы показывают, что существующие представления о структуре поля горизонтального электрического диполя или кабеля конечной длины, основанные на использовании квазистационарного приближения и решения задачи без учета токов смещения в воздухе и влияния ионосферы, требуют корректировки при проведении измерений на больших расстояниях от источников такого типа.

Характер изменения диаграммы направленности с удалением от рассматриваемого источника для составляющей E_x иллюстрируется рис. 3. В данном случае под диаграммой направленности понимается график значений E_x по планшету на определенном расстоянии от источника. Диаграмма направленности для квазистационарного поля и расстояния $10L$ приведена на рис. 3, а.

Отношение амплитуд поля по направлениям вдоль и вкrest кабеля здесь равно 0,5. Для поля в волноводе на этом же расстоянии диаграмма направленности принимает вид, показанный на рис. 3, б, и отношение амплитуд поля становится равным 0,9. Существенно диаграмма направленности меняется на большом удалении от источника $100L$ (рис. 3, в). При этом отношение амплитуд поля вдоль и вкrest кабеля равно 5,4.

Особенности изменения составляющей поля H_y , включая оценки расстояний, начиная с которых необходим учет влияния токов смещения в воздухе и ионосферы, аналогичны рассмотренным выше закономерностям, установленным для составляющей E_x .

Проанализируем характер изменения других составляющих поля СНЧ-радиоустановки (рис. 4). Составляющие E_y и H_x вдоль осей x и y принимают нулевые значения, поэтому рассмотрим закономерности их изменения вдоль профиля r/L , ориентированного под углом 45° к направлению кабеля. На относительно небольших расстояниях от источника составляющие полей E_y (рис. 4, а) и H_x (рис. 4, б) в волноводе совпадают с составляющими квазистационарного поля, а при удалении от источника необходимо учитывать влияние ионосферы и токов смещения в воздухе. По рассматриваемому профилю учет токов смещения в воздухе для этих составляющих необходим начиная с расстояния 600 км, а влияние ионосферы — с расстояния 200 км.

Составляющая поля E_z принимает нулевые значения в экваториальной зоне кабеля, поэтому проанализируем закономерности ее изменения вдоль кабеля по оси x (рис. 4, в). Учет токов смещения в воздухе в этом случае необходим начиная с расстояния 600 км, а влияния ионосферы — с расстояния 100 км.

Составляющая поля H_z принимает нулевые значения по направлению вдоль кабеля. Рассмотрим характер ее изменения в экваториальной зоне по оси y (рис. 4, г). Анализ поведения H_z показывает, что данная составляющая в наименьшей степени подвержена влиянию рассматриваемых факторов — токов смещения в воздухе и ионосферы. При этом влияние ионосферы в интервале изменения y от 100 до 300 км проявляется в уменьшении H_z . Минимум на графике $|H_z|$, составляющий 0,25 от значения квазистационарного поля, отмечается на расстоянии 200 км от источника. Начиная с расстояния 600 км значения H_z в волноводе превосходят соответствующие значения квазистационарного поля. При этом основной вклад в увеличение амплитуды H_z вносят токи смещения в воздухе, а ионосфера практически не влияет на поведение этой составляющей поля.

Следует отметить, что составляющая H_z характеризуется наиболее быстрым убыванием амплитуды с удалением от источника. На расстоянии 3000 км ($100L$) ее амплитуда уменьшается на семь порядков по отношению к уровню поля на расстоянии 30 км (L) от источника, тогда как для

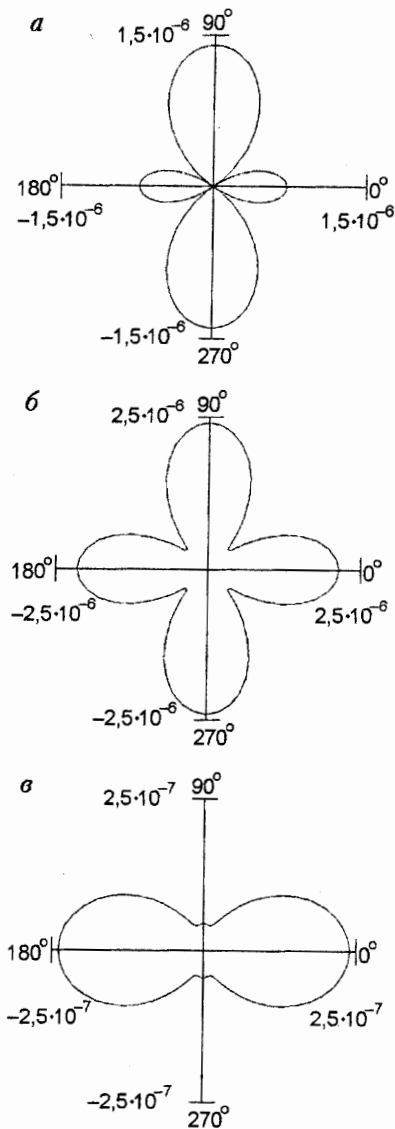


Рис. 3. Диаграммы направленности СНЧ-радиоустановки для $|E_z|$.

а, б — удаление от источника $10L$ (а — квазистационарное поле, б — поле в волноводе); в — удаление от источника $100L$, поле в волноводе; $|E_z|$ выражено в В/м.

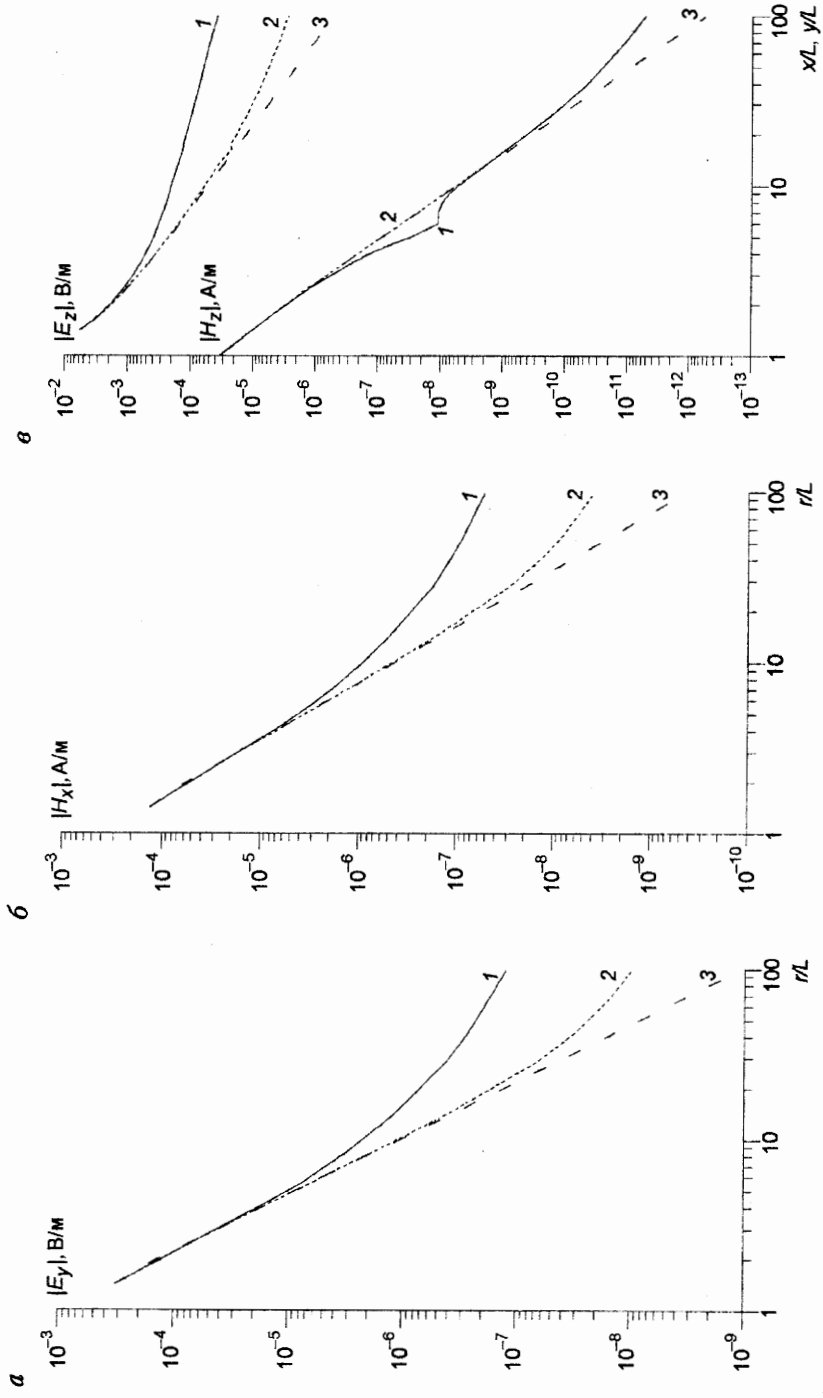


Рис. 4. Графики изменения модулей $|E_y|$ (а), $|H_x|$ (б) для профиля, ориентированного под углом 45° к оси x , $|E_z|$ по профилю $y/L = 0$ (в) и $|H_z|$ по профилю $x/L = 0$ (в). Обозначения см. на рис. 2.

других составляющих поля это уменьшение составляет четыре-пять порядков. Наиболее медленно убывает вертикальная составляющая электрического поля E_z , для которой амплитуда при изменении расстояния от 30 до 3000 км уменьшается только на три порядка.

Наглядно структура поля СНЧ-радиостановки иллюстрируется изолиниями составляющих, рассчитанных с достаточной детальностью по планшету, в центре которого находится данный источник. Рассмотрим характер изолиний составляющих квазистационарного электромагнитного поля кабеля вблизи источника (рис. 5) и поля в волноводе на удалении от источника (рис. 6). Анализ выполним для первой четверти планшета, причем его размеры при рассмотрении нормального поля составляют $6L \times 6L$, а поля в волноводе — $100L \times 100L$. На приведенных рисунках кабель расположен по оси x и полудлине кабеля L соответствует расстояние по этой оси от 0 до 1. Изолинии E оцифрованы в В/м, H — А/м. При этом использован логарифмический масштаб нанесения изолиний с шагом 1 в пределах каждого порядка.

Составляющие нормальных полей E_x и H_y по направлениям вдоль осей x и y имеют плавный закономерный характер изменения (рис. 5). Зоны минимальных значений полей с резкими градиентами ориентированы под углами около 40° относительно оси x . Значения E_x и H_y в экваториальной зоне превосходят соответствующие значения на оси кабеля. Для полей E_x и H_y в волноводе (рис. 6) зона минимальных значений выражена менее контрастно. Ее положение, как отмечалось выше при анализе рис. 2, в, смещается к оси y и примерно соответствует углу $60 - 70^\circ$ относительно оси x . При этом значения E_x и H_y по направлению вдоль кабеля превосходят соответствующие значения в экваториальной зоне кабеля.

Составляющие квазистационарных полей E_y и H_x по направлениям вдоль осей x и y равны нулю. Форма изолиний составляющих квазистационарного поля в первом квадранте близка к окружностям (рис. 5). Для полей E_y и H_x в волноводе (рис. 6) изолинии вытягиваются вдоль направления, ориентированного под углом 45° к оси x , а их значения вдоль осей x и y , как и в случае нормальных полей, равны нулю.

Характер изолиний составляющих квазистационарных полей E_z и H_z (рис. 5) аналогичен характеру этих же составляющих в волноводе: нулевые значения вдоль осей соответственно y и x , и изменения с определенным градиентом вдоль осей x и y .

Влияние ионосферы и токов смещения в воздухе на больших расстояниях от СНЧ-радиостановки приводят также к изменению поляризации электрического и магнитного полей. При проведении расчетов без учета указанных факторов квазистационарные электрическое и магнитное поля в дальней зоне горизонтального электрического диполя или кабеля конечной длины имеют линейную поляризацию. Результаты расчетов электрического поля в волноводе показаны на рис. 7. Вдоль осей x и y электрическое поле в горизонтальной плоскости имеет линейную поляризацию. По другим направлениям, как видно из приведенного рисунка, поляризация эллиптическая, причем эллиптичность поляризации (отношение b/a малой и большой полуосей эллипса поляризации) увеличивается по мере удаления от источника и приближения к направлению, ориентированному под углом $60 - 70^\circ$ к оси x .

Наличие эллиптичности поляризации электрического и магнитного полей СНЧ-радиостановки было установлено нами ранее по результатам экспериментальных работ [22]. Были выполнены круговые измерения составляющих электрического и магнитного поля на различных расстояниях от источника: около г. Апатиты (150 км от источника), в пос. Вокнаволоок (470 км) и на полигоне Вуокса, Карельский пер. (950 км). В результате установлено увеличение эллиптичности поляризации, ко-

торая менялась последовательно по мере удаления от источника и составляла для магнитного поля соответственно $b/a = 0,07; 0,25; 0,3$. По расчетам с использованием разработанных программных средств эти значения для указанных точек были соответственно равны $b/a = 0,026; 0,22; 0,32$.

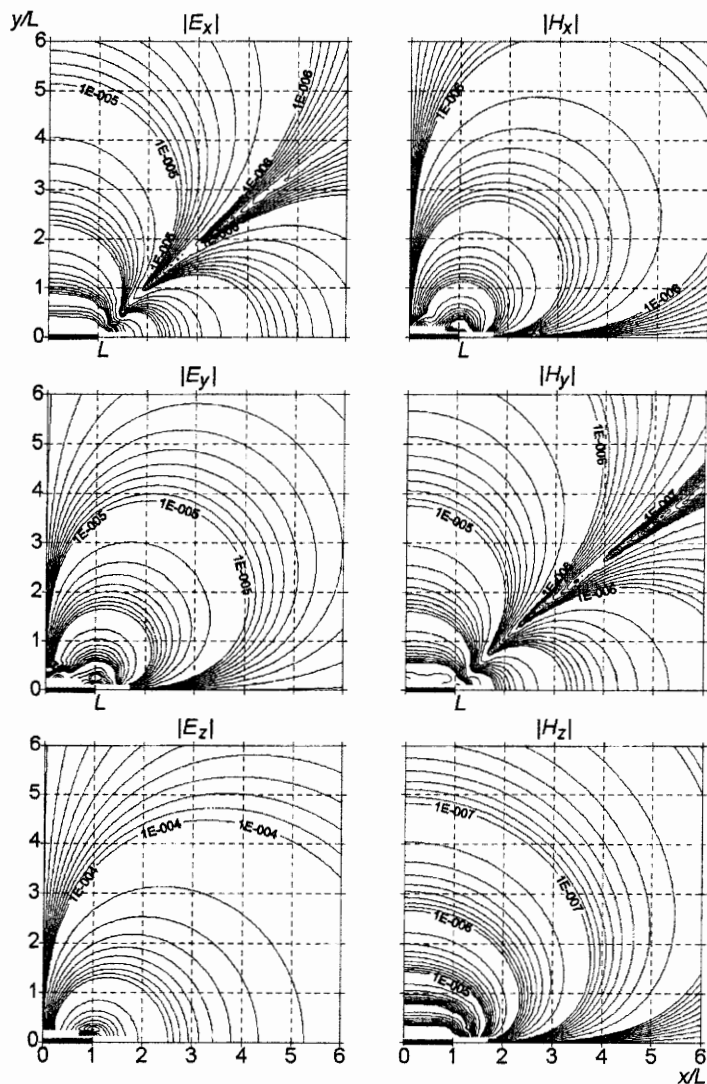


Рис. 5. Изолинии модулей составляющих электромагнитного поля на малых расстояниях от источника (квазистационарное поле).

Изменение эллиптичности поляризации электрического поля СНЧ-радиоустановки в волноводе земля – ионосфера иллюстрируется рис. 8, а, на котором представлены изолинии отношения b/a в горизонтальной плоскости. Для параметров, принятых при проведении расчетов, эллиптичность поляризации становится заметной ($b/a = 0,1$) на удалении 300 км от источника по направлению, ориентированному под углом 45° к оси x . В наибольшей степени эллиптичность поляризации проявля-

ется на рассматриваемом планшете для области $x/L = 20$ и $y/L = 80 \div 100$, где она приближается к круговой ($b/a = 0,8$). Эта область совпадает с зоной минимальных значений E_x , отмеченной ранее при анализе характера изолиний данной составляющей электрического поля (см. рис. 6).

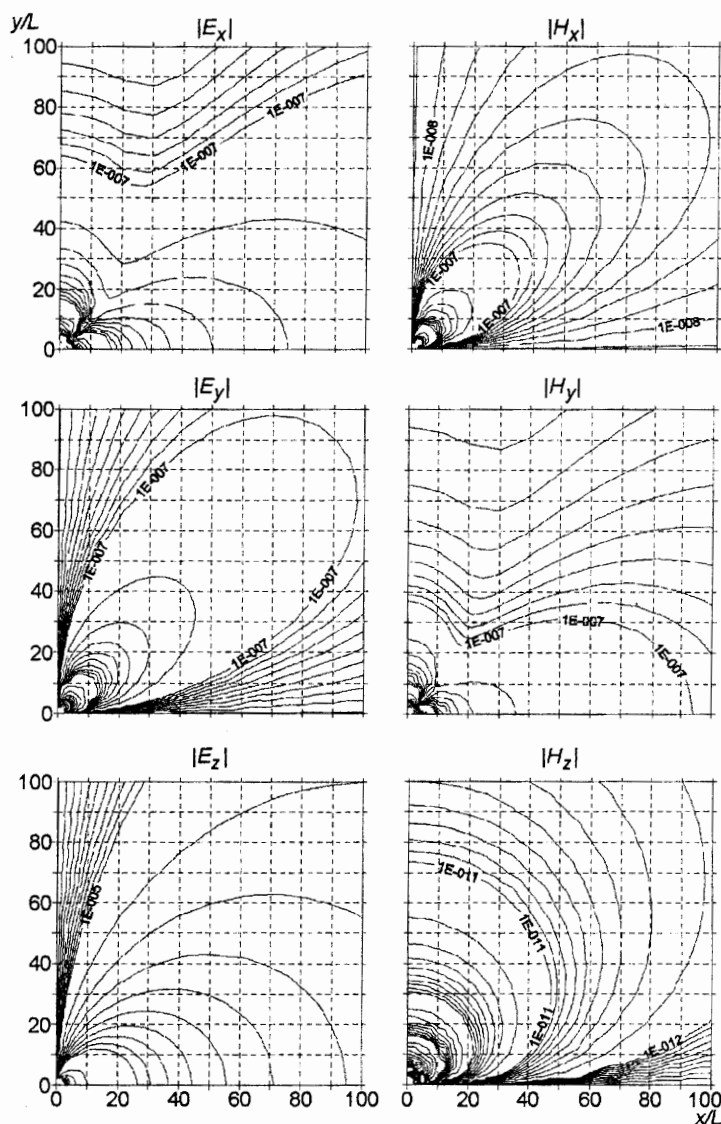


Рис. 6. Изолинии модулей составляющих электромагнитного поля на больших расстояниях от источника (поле в волноводе).

На рис. 8, б показаны изолинии углов поворота α больших осей эллипсов поляризации электрического поля относительно оси x . Анализ приведенных изолиний показывает, что для направлений, ориентированных под углами от 0 до $60 - 70^\circ$ относительно направления кабеля, значения α меняются закономерно, примерно совпадая с указанными направлениями и принимая значения от $\alpha = 0$ до $\alpha = 60 - 70^\circ$.

Однако для направлений, приближающихся к экваториальной зоне кабеля (ориентированных под углами от $60 - 70^\circ$ до 90° относительно направления кабеля), эти углы меняются намного быстрее от $\alpha = 60 - 70^\circ$ до $\alpha = 180^\circ$.

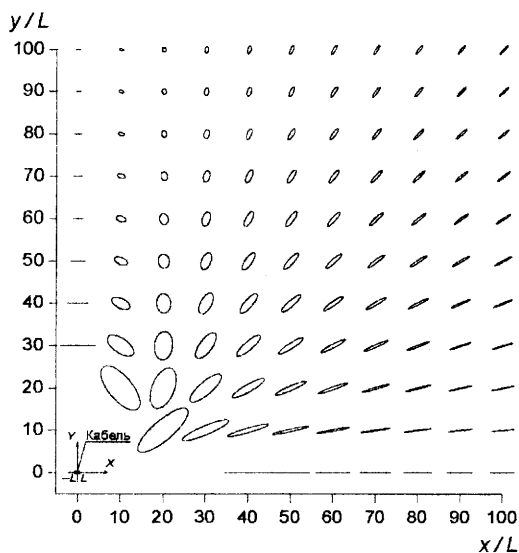


Рис. 7. Эллипсы поляризации горизонтальной составляющей электрического поля в плоскости XU .

1. На основе строгого решения задачи о поле горизонтального электрического диполя и кабеля конечной длины в плоском волноводе земля-ионосфера получены выражения и разработаны программные средства для расчетов составляющих электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки "Зевс". В отличие от подходов, реализованных при решении задач распространения радиоволн и связи, в которых, с одной стороны, рассматривается сферическая модель волновода и учитываются особенности строения ионосферы, а с другой стороны, применяются асимптотические формулы для вычисления составляющих поля, нами использовано решение без упрощающих допущений о параметрах источника и свойствах среды, но при упрощенной модели волновода и ионосферы. Данный подход нацелен на изучение структуры электромагнитного поля источника применительно к решению геолого-геофизических задач и прогнозированию землетрясений. Созданные программные средства позволяют проводить расчеты полей СНЧ-радиоустановки как в непосредственной близости от источника, так и на удалении от него до расстояния примерно 3000 км, когда необходим учет сферичности волновода земля — ионосфера. В разработанных программах производится численное интегрирование комплексных выражений, содержащих осциллирующие функции Бесселя, с относительной погрешностью 10^{-9} .

2. В результате выполненных исследований показано, что при проведении расчетов составляющих электромагнитного поля на значительном удалении от источников такого типа даже для сверхнизких частот (десятки-сотни герц) необходим учет токов смещения в воздухе. Это обусловлено влиянием членов в общем решении задачи, содержащих множители $k_0 r$, вклад которых при малых значениях волнового числа воздуха k_0 и больших расстояниях r (сотни-тысячи километров) становится

Приведенные материалы свидетельствуют о том, что при изменении полей СНЧ-радиоустановки вблизи экваториальной зоны данного источника необходимо уделять особое внимание выбору оптимальной ориентации измерительной установки. Работы по сверхнизкочастотному зондированию на разных частотах или мониторингу на одной частоте необходимо сопровождать круговыми измерениями электрического и магнитного полей. При этом следует учитывать то обстоятельство, что в реальных условиях возможно дополнительное изменение ориентации горизонтальной составляющей вектора электрического поля за счет влияния неоднородностей среды.

В заключение можно сделать следующие выводы.

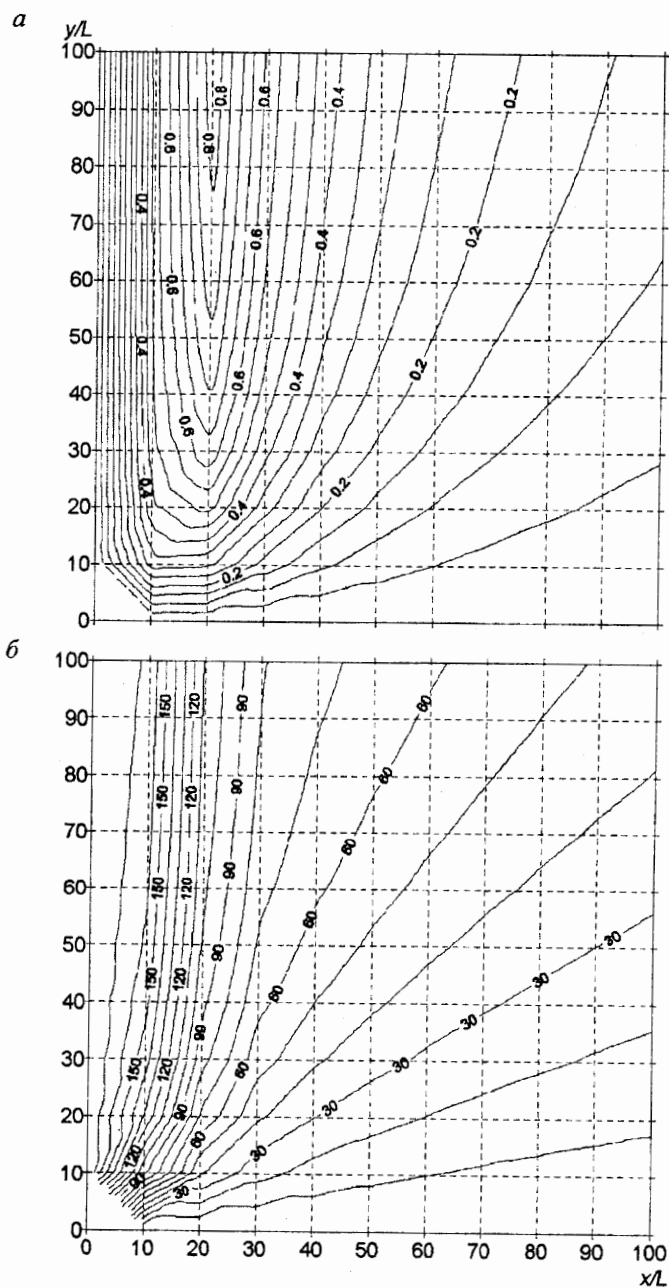


Рис. 8. Изолинии эллиптичности поляризации (а) и углов поворота больших осей эллипсов поляризации (б) горизонтальной составляющей электрического поля в плоскости XY.

весьма заметным. Влияние токов смещения в воздухе приводит к увеличению амплитуды составляющих электромагнитного поля и существенному изменению диаграммы направленности данного источника.

3. Показано, что в результате влияния ионосферы и токов смещения в воздухе составляющие электрического и магнитного полей становятся эллиптически поляризованными, причем эллиптичность поляризации возрастает с удалением от источника. Выделены зоны, в которых эллиптичность поляризации проявляется в наибольшей степени, а также наиболее быстро изменяются углы поворота больших осей эллипсов поляризации составляющих поля в горизонтальной плоскости.

4. По материалам выполненных расчетов проведен анализ закономерностей изменения составляющих электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки в плоском волноводе земля — ионосфера. Показано, что влияние ионосферы в наименьшей степени проявляется для вертикальной составляющей магнитного поля. Для различных составляющих поля определены расстояния, начиная с которых становится заметным влияние токов смещения и ионосферы, а также можно использовать аппроксимацию рассматриваемого источника вместо кабеля диполем.

5. Установленные закономерности изменения электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки следует использовать при планировании работ с данным источником, разработке методик комплексирования с другими электромагнитными методами и применении СНЧ-радиоустановки при решении геолого-геофизических задач и прогнозировании землетрясений. Рассмотренные особенности поля необходимо также учитывать при проведении глубинных электромагнитных зондирований с источниками, аппроксимируемыми горизонтальным электрическим диполем, и большим расстоянии между источником и точкой наблюдения.

Указатель литературы

1. Сараев А. К., Пертель М. И., Парфентьев П. А. и др. Результаты экспериментальных исследований электромагнитных полей СНЧ-радиоустановки для целей прогноза землетрясений на Северном Кавказе // Закономерности эволюции земной коры: Тез. докл. междунар. конф., С.-Петербург, 15–18 октября 1996 г. СПб., 1996. С. 1-271.
2. Пертель М. И., Харламов М. М., Сараев А. К. Комплексирование АМТ-зондирований с измерениями полей СНЧ-радиоустановки // Закономерности эволюции земной коры: Тез. докл. междунар. конф., С.-Петербург, 15–18 октября 1996 г. СПб., 1996. С. 1-265.
3. Ивочкин В. Г., Сараев А. К., Никифоров А. Б. Поляризационные особенности электромагнитного поля промышленных ЛЭП // Электромагнитные исследования с контролируемыми источниками: Тез. докл. междунар. конф., С.-Петербург, 27–31 мая 1996 г. СПб., 1996. С. 55–56.
4. Вешев А. В. Электропрофилирование на постоянном и переменном токе. 2-е изд. Л.: Недра, 1980. 390 с.
5. Ваньян Л. Л. Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир, 1997. 219 с.
6. Жданов М. С. Электроразведка: Учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 316 с.
7. Электроразведка: Справочник геофизика: В 2 кн. / Под ред. В. К. Хмелевского и В. М. Бондаренко. Кн. 1. 2-е изд. М.: Недра, 1989. 438 с.
8. Альперт Я. Л., Гусева Э. Г., Флигель Д. С. Распространение низкочастотных электромагнитных волн в волноводе Земля–ионосфера. М.: Наука, 1967. 123 с.
9. Макаров Г. И., Новиков В. В., Орлов А. Б. Современное состояние исследований распространения СДВ в волноводном канале Земля–ионосфера // Изв. вузов. Радиофизика. 1970. Т. 13. № 3. С. 321–355.
10. Galeys J. Terrestrial propagation of long electromagnetic waves. Oxford: Pergamon Press, 1972. 362 p.
11. Bannister P. R. Summary of ELF propagation validation system field measurement. 1976 to 1978 // IEEE J. Oceanic Engineering. 1984. Vol. OE-9. N 3. P. 189–195.

12. Корчагин Ю. А. Источники электромагнитного поля очень низких частот. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1988. 208 с.
13. Макаров Г. И., Новиков В. В., Рыбачек С. Т. Распространение радиоволн в волноводном канале Земля-ионосфера и в ионосфере. М.: Наука, 1994. 152 с.
14. Кириллов В. В. Параметры волновода Земля-ионосфера в диапазоне СНЧ // Проблемы дифракции и распространения волн. Вып. 25. СПб., 1993. С. 35-52.
15. Косткин П. М., Морозова О. М. Электромагнитное поле вертикального электрического диполя в приповерхностной области // Методы разведочной геофизики. Поиск и прогнозная оценка рудных месторождений методами электроразведки. Л., 1990. С. 113-124.
16. Вешев А. В., Косткин П. М., Морозова О. М. Электромагнитное поле вертикального электрического диполя, расположенного в пласте постоянной мощности. Деп. в ВИНТИ. № 7895-В88. Л., 1988. 30 с.
17. Вешев А. В., Ладатко О. Н., Морозова О. М. Нормальное поле вертикального магнитного диполя // Вопросы геофизики. Вып. 30. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1983. С. 159-204.
18. Крочрод А. С. Узлы и веса квадратурных формул. М.: Наука, 1964. 143 с.
19. Савинова Л. Т. О вычислении некоторых типов определенных интегралов от осциллирующих функций // Труды мат. ин-та им. В. А. Стеклова. 1962. Т. 16. С. 166-181.
20. Longman S. M. A method for the numerical evaluation of finite integrals of oscillatory functions // Mathematics of Computation. 1960. Vol. 14. N 69. P. 53-59.
21. Bessel functions. Part 1: Functions of order zero and unity British Association for the Advancement of Science: Mathematical tables, VI. Cambridge, 1937.
22. Saraev A. K., Ivochkin V. G., Kostkin P. M., Kocherov A. B. Experimental and theoretical researches of polarization features of the ELF radio station electromagnetic field // Russian-German seminar "Actual problems in deep EM studies", Moscow, 11-13 March 1997: Abstract of communications. М., 1997. P. 30.

Работа выполнена при поддержке программы "Университеты России", проект № 2140, и ФЦП "Интеграция", проект № 326.66.