

УДК 621.3.029.4+537.877+621.372.81.09

РАДИАЛЬНАЯ КОМПОНЕНТА СВЕРХНИЗКОЧАСТОТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЯ ПРИ НИЗКОЙ ПРОВОДИМОСТИ ЗЕМЛИ НА ТРАССЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

*Е. Д. Терещенко*¹, *А. Е. Сидоренко*^{1 *}, *В. Ф. Григорьев*¹, *П. Е. Терещенко*²

¹ Полярный геофизический институт, г. Мурманск;

² Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Исследуется сверхнизкочастотное поле заземлённого горизонтального электрического диполя на высокоширотной субмеридиональной трассе с протяжённостью до 1 000 км. В отличие от большинства предшествующих работ, в данной статье рассмотрено распространение волн поперёк оси диполя, когда основной компонентом магнитного поля является радиальная. По измерениям поля на расстоянии менее трёх высот ионосферы найдена частотная дисперсия проводимости земли под источником, определяющей коэффициент возбуждения волновода Земля—ионосфера. Типичные параметры распространения сверхнизкочастотных волн уточнены с учётом специфики используемой в эксперименте трассы. Показана важность учёта проводимости земли при распространении излучения вдоль низкопроводящих областей. В полярной системе координат, связанной с источником, рассчитаны области преобладания одной из компонент магнитного поля, а также области, где необходим учёт обеих компонент. Отмечена теоретическая возможность определения фазовой скорости волны по отношению измеренных компонент магнитного поля на больших расстояниях.

ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитные волны диапазона сверхнизких частот (СНЧ, 30÷300 Гц) характеризуются слабым пространственным затуханием, глубоким проникновением вглубь природных сред и относительно высокой устойчивостью к изменениям геофизических условий на трассе распространения. Благодаря этому такие волны применяются для специальной связи с погружёнными объектами [1]. Также ведутся разработки перспективных методов зондирования такими волнами земной коры с помощью контролируемых источников (Controlled Source Audio Magnetotellurics, CSAMT) [2, 3], исследуются возможности применения таких волн для мониторинга состояния ионосферы и сейсмического мониторинга [4, 5].

В работах, связанных с распространением СНЧ радиоволн в волноводе Земля—ионосфера, в качестве искусственного источника поля, как правило, рассматривается горизонтальный электрический диполь. Неоднократные измерения искусственных СНЧ полей на больших расстояниях от источников показали достаточно хорошее согласие их величин с результатами теоретических расчётов при использовании параметров распространения, усреднённых для дневных или ночных условий [6, 7]. Часто используемое при этом приближение, согласно которому магнитное поле горизонтального диполя имеет единственную (азимутальную) компоненту, ортогональную направлению на источник, позволяет наглядно интерпретировать, в частности, результаты исследований условий распространения волн [8, 9] и определения направления прихода излучения [10]. Ввиду малости радиальной составляющей магнитного поля на большей части земной поверхности её измерениями на расстояниях более 1 000 км от источника обычно пренебрегали. В данной

* anton@pgi.ru

работе мы приводим результаты экспериментальных измерений СНЧ магнитного поля в области, где его радиальная компонента существенно преобладает.

Проводимость земли под источником, влияющая на эффективность возбуждения поля, зависит от частоты излучения. Характер этой зависимости можно определить по измерениям магнитного поля на расстояниях не более трёх высот волновода, когда влиянием ионосферы можно пренебречь. Для удобства использования в расчётах полученная зависимость проводимости от частоты может быть аппроксимирована аналитически с помощью модели двухслойной структуры.

Важной особенностью рассматриваемого в работе эксперимента является низкая проводимость земли вдоль выбранной трассы распространения. Обычно в литературе рассматривается распространение СНЧ волн в дневных и ночных условиях на трассах, вдоль которых импеданс земли пренебрежимо мал по сравнению с импедансом ионосферы [11, 12]. Однако области с низкой проводимостью земли, характерные для Кольского полуострова и Карелии, могут оказывать влияние на распространение СНЧ волн, изменяя их фазовую скорость и затухание с расстоянием. Влияние этого фактора будет учтено при интерпретации результатов.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА



Рис. 1. Геометрическая схема эксперимента

Эксперимент проводился 13–14 июня 2013 года с 04:00 до 06:00 UT. Расположенный на Кольском полуострове источник излучения с антенной в виде горизонтального электрического диполя, заземлённого на концах, излучал квазимонохроматические сигналы в диапазоне частот $44 \div 188$ Гц. Длина его ориентированной вдоль широтного направления антенны L составляла приблизительно 60 км, длительность сеансов генерации на каждой частоте 10 мин.

Схема эксперимента показана на рис. 1. Измерения магнитного поля проводились в ближней зоне источника в обсерватории Ловозеро (Кольский полуостров) и в двух удалённых приёмных пунктах: в г. Петрозаводске (республика Карелия) на расстоянии 765 км и в деревне Сторожно (Ленинградская область) на расстоянии 915 км. Восточное магнитное склонение в д. Сторожно и г. Петрозаводске составляет 10° , в обс. Ловозеро 12° . Как видно из рис. 1, г. Петрозаводск и д. Сторожно лежат практически на одной трассе распространения, а их азимутальные углы в полярной системе координат, связанной с антенной, не более чем на 5° отличаются от направления поперёк оси диполя.

Измерения магнитного поля проводились синхронно с использованием однотипных индукционных магнитометров с частотой дискретизации 512 Гц. В штатную комплектацию магнитометра входят три магнитоиндукционных датчика,

предназначенных для регистрации магнитного поля в диапазонах крайне низких и сверхнизких частот. Пара датчиков компонент магнитного поля H_{NS} (проекция на направление север—юг) и H_{WE} (проекция на направление запад—восток) ориентировалась в горизонтальной плоскости по сторонам света при помощи магнитной буссоли и уровня, а третий датчик вертикальной компоненты магнитного поля H_Z устанавливался вертикально. Приёмные системы магнитометров оснащены цифровой системой сбора и регистрации данных, а также системой высокоточной привязки ко всемирному времени по сигналам спутниковых навигационных систем. Во время сеансов генерации поля на передающей установке проводилась цифровая регистрация силы тока в антенне, также привязанная ко всемирному времени по сигналам спутниковых навигационных систем. Записанные данные проходили цифровую спектральную обработку, при которой оценивались спектральные плотности мощности фоновых шумов, полезного сигнала, а также амплитуды и фазовые сдвиги сигналов относительно тока в передающей антенне.

Измерения магнитного поля в обл. Ловозеро необходимы для нахождения эффективной проводимости земли под источником. Близость этого приёмного пункта к передающей антенне позволяет получить высокоточные измерения двух горизонтальных компонент поля, практически исключив возможное влияние ионосферы.

Особенности измерений в Петрозаводске и Сторожно связаны с геометрическим расположением этих пунктов относительно источника. Близость к поперечному направлению относительно оси диполя приводит к тому, что в них практически отсутствует азимутальная составляющая поля (см. подтверждающие теоретические оценки ниже). По этой причине надёжные данные регистрируются только на одном из датчиков, который ориентирован вдоль оси север—юг.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕРХНИЗКОЧАСТОТНОГО ПОЛЯ

Рассмотрим горизонтальный электрический диполь с длиной L и током I , меняющимся с частотой f . Для расчётов СНЧ магнитного поля \mathbf{H} этого диполя, которое распространяется в плоском волноводном канале Земля—ионосфера с высотой h , на расстояниях ρ от источника, больших длины подземной волны λ_e , при зависимости от времени вида $\exp(i\omega t)$ воспользуемся формулами [13]

$$H_\varphi = \frac{-\eta_g k^2 p G_h(t)}{4\omega\mu_0\rho} \left[H_0^{(2)}(k\rho) - \frac{1}{k\rho} H_1^{(2)}(k\rho) \right] \left[\frac{\rho/a}{\sin(\rho/a)} \right]^{1/2} \cos\varphi, \quad (1)$$

$$H_\rho = -\frac{\eta_g k p H_h(t)}{4\omega\mu_0\rho^2} H_1^{(2)}(k\rho) \left[\frac{\rho/a}{\sin(\rho/a)} \right]^{3/2} \sin\varphi, \quad (2)$$

где $H_0^{(2)}(k\rho)$ и $H_1^{(2)}(k\rho)$ — функции Ханкеля 2-го рода нулевого и первого порядка соответственно, $H_h(t) = G_h(t) + V_h(t)$, $V_h(t) = t^3 \operatorname{cth} t \operatorname{csch}^2 t$, $G_h(t) = (2t/\pi) \operatorname{cth} t + (1 - 2/\pi)t^2 \operatorname{csch}^2 t$, $t = \pi\rho k_0^2 / (2hk^2)$, $\eta_g = \sqrt{i\omega\mu_0/\sigma_e}$ — импеданс земли под антенной, μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, σ_e — эффективная удельная проводимость земли под антенной, $k = \omega/v - i\alpha$ — волновое число в волноводе Земля—ионосфера вдоль направления распространения, $k_0 = \omega/c$ — волновое число в свободном пространстве, c — скорость света в вакууме, $p = IL$ — электрический дипольный момент источника, a — радиус Земли, $\omega = 2\pi f$ — циклическая частота, φ — угол между осью диполя и направлением на точку наблюдения, ρ — расстояние от источника до точки измерений. Фазовая скорость v и коэффициент затухания α в волноводе определяются его характеристиками и зависят от частоты возбуждаемого поля f , высоты волновода h и проводимости его стенок.

Далее подробно рассмотрим определение параметров возбуждения и распространения поля в волноводе, необходимых для выполнения расчётов по формулам (1) и (2).

2.1. Определение эффективной проводимости земли под источником

Проводимость земли под источником σ_e определяет эффективность возбуждения волновода. На расстояниях от источника $1/|k_e| < \rho < 3h$, где

$$|k_e| \approx \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\sigma_e}{\omega \varepsilon_0}}$$

— модуль волнового числа в земле для СНЧ волн, ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, влиянием ионосферы на поле диполя можно пренебречь.

Тогда, пользуясь асимптотическими формулами, описывающими СНЧ поле горизонтальной заземлённой на концах линии на поверхности однородного полупространства [14] при $|k_e \rho| \gg 1$, запишем

$$H_x \sim -\frac{iIy}{2\pi k_e} \left(\frac{1}{\rho_1^3} - \frac{1}{\rho_2^3} \right), \quad (3)$$

$$H_y \sim -\frac{iIy}{2\pi k_e} \left(\frac{L' - x}{y^2 \rho_2} + \frac{L' + x}{y^2 \rho_1} + \frac{L' + x}{\rho_1^3} + \frac{L' - x}{\rho_2^3} \right), \quad (4)$$

где x, y — декартовы координаты точки измерений, ρ_1 и ρ_2 — расстояния от неё до концов антенны. В результате по измерениям поля в обл. Ловозеро можно определить эффективную проводимость σ_e на используемых в эксперименте частотах. В формулах (3) и (4) предполагается, что декартова система координат связана с центром антенны с длиной $L = 2L'$, а ось абсцисс совпадает с направлением антенны.

Далее для найденных значений σ_e были подобраны параметры такой двухслойной подстилающей среды, которая позволила бы теоретически получить согласующиеся с наблюдениями результаты — амплитуды горизонтальных компонент магнитного поля и эффективную проводимость. Расчёты магнитного поля заземлённой линии на поверхности двухслойной земли проводились по формулам, приведённым в работе [15]. Моделирование реальной среды двухслойной структурой здесь удобно с практической точки зрения, поскольку даёт возможность непрерывно в заданном диапазоне частот определить вид поверхностного импеданса Z_e и соответствующую эффективную проводимость σ_e земли под источником.

Оптимальные параметры такой двухслойной среды определялись по критерию минимума суммарной невязки Φ измеренных $H_x^{\text{meas}}, H_y^{\text{meas}}$ и расчётных $H_x^{\text{theor}}, H_y^{\text{theor}}$ амплитуд полного горизонтального поля на пяти рабочих частотах $f_n, n = 1, \dots, 5$:

$$\Phi(\sigma_1, \sigma_2, d) = \sum_n \left| \left\{ [H_x^{\text{meas}}(f_n, \sigma_1, \sigma_2, d)]^2 + [H_y^{\text{meas}}(f_n, \sigma_1, \sigma_2, d)]^2 \right\} - \left\{ [H_x^{\text{theor}}(f_n, \sigma_1, \sigma_2, d)]^2 + [H_y^{\text{theor}}(f_n, \sigma_1, \sigma_2, d)]^2 \right\} \right|,$$

где σ_1 и σ_2 — параметры проводимости верхнего слоя и подложки соответственно, d — толщина верхнего слоя.

Результат подбора двухслойной структуры по такому алгоритму неоднозначен и зависит от начальных значений σ_1^0, σ_2^0 и d^0 . Но поскольку рассматриваемая задача не требовала определения конкретного вида такой структуры, был выбран один из типичных вариантов строения верхней

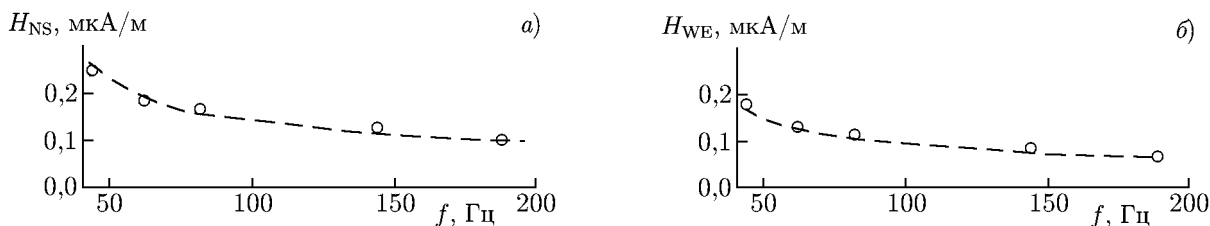


Рис. 2. Измерения (точки) и расчёты (линии) поля в obs. Ловозеро

части земной коры центральной части Кольского полуострова: $\sigma_1 = 4 \cdot 10^{-5}$ См/м, $\sigma_2 = 1,4 \times 10^{-5}$ См/м, $d = 4,2$ км. Амплитуды компонент H_{NS} и H_{WE} , рассчитанные для этой модели, показаны на рис. 2 совместно с результатами измерений поля в obs. Ловозеро (при силе тока в передающей антенне 1 А). На рис. 3 приведены значения эффективной проводимости однородной

земли на использованных в эксперименте частотах и их аппроксимация в рамках двухслойной модели. Видно, что выбранная двухслойная модель достаточно хорошо описывает характер зависимости проводимости земли от частоты зондирующего излучения.

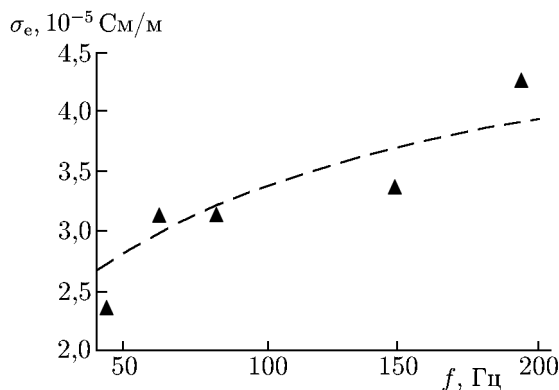


Рис. 3. Эффективная проводимость земли под источником: треугольники относятся к однородным моделям для каждой отдельной частоты, пунктир — к двухслойной структуре

2.2. Определение параметров распространения

Помимо силы тока в антенне и проводимости земли под источником, для вычисления полей в волноводе Земля—ионосфера требуется задание параметров распространения: фазовой скорости v , коэффициента затухания α , а также высоты волновода h , которые определяют продольное волновое число в СНЧ диапазоне:

$$k = \beta - i\alpha = \sqrt{k_0^2 - K^2}, \quad (5)$$

где $\beta = k_0 c/v$, $K^2 \approx ik_0(\Delta_g + \Delta_i)/h$ — квадрат радиального волнового числа, Δ_g и Δ_i — приведённые поверхностные импедансы земли и ионосферы.

Как правило, используемые в литературе параметры распространения соответствуют модели волновода, в которой земля считается близкой к идеальному проводнику [6, 11, 12] (величина σ_g имеет порядок $10^{-3} \div 5$ См/м [11], $\sigma_g \gg \sigma_i$) и слагаемым Δ_g в выражении для K^2 в (5) можно пренебречь. В нашем эксперименте характерная проводимость земли на трассе распространения в СНЧ диапазоне довольно низкая ($10^{-6} \div 10^{-5}$ См/м) и сопоставима с проводимостью ионосферы. Следовательно, типичные параметры распространения требуют уточнения. Для этого учтём вклад импеданса низкопроводящей земли в (5), сохранив неизменной модель ионосферы.

Определим из соотношений (5) проводимость ионосферы в ночных условиях для заданных параметров c/v , h и α , пренебрегая Δ_g :

Таблица 1. Параметры распространения и соответствующая эффективная проводимость ночной ионосферы [6]

f , Гц	h , км	c/v	α , дБ/Мм	σ_i , мкСм/м
44	73,0	1,11	0,74	5,9
62	73,8	1,11	0,90	4,6
82	74,5	1,10	1,06	4,2
144	75,9	1,09	1,55	3,0
188	76,6	1,08	1,91	2,8

Таблица 2. Проводимость земли на трассе распространения (центральная Карелия) по данным [16]

f , Гц	σ_i , мкСм/м
44	15
62	12
82	9,8
144	8,0
188	7,9

Таблица 3. Уточнённые параметры распространения в эксперименте с учётом реальной проводимости земли на трассе распространения излучения

f , Гц	c/v	α , дБ/Мм
44	1,17	1,19
62	1,16	1,60
82	1,15	1,96
144	1,13	2,99
188	1,11	3,53

$$|K^2| \approx \frac{k_0}{h} |\Delta_i| \approx \frac{k_0}{hZ_0} \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{\sigma_i}},$$

$$\sigma_i \approx \omega\mu_0 \left(\frac{k_0}{Z_0 |K^2| h} \right)^2 = \omega\mu_0 \left[\frac{k_0}{Z_0 h |k_0^2 - (k_0 c/v - i\alpha)^2|} \right]^2, \quad (6)$$

где $Z_0 = (\mu_0/\varepsilon_0)^{1/2} = 120\pi$ Ом — характеристический импеданс вакуума.

Подставляя в соотношения (6) интерполированные значения параметров из работы [6] на частотах, используемых в эксперименте, получим соответствующие значения $\sigma_i(f)$ (см табл. 1).

Результаты исследований глубинного строения земли в Карелии методами электроразведки [16] дают значения проводимости земли σ_g на трассе распространения, приведённые в табл. 2. Зная значения σ_g и σ_i и пользуясь выражением (5), определим фазовые скорости и коэффициенты затухания, соответствующие условиям нашего эксперимента, т. е. низкой проводимости земли (табл. 3).

Таким образом, для условий рассматриваемого эксперимента определены все параметры, необходимые для теоретических расчётов полей в г. Петрозаводске и д. Сторожно по формулам (1) и (2).

3. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сопоставим результаты измерений СНЧ поля в г. Петрозаводске и д. Сторожно с теоретическими расчётами, используя полученные выше оценки. Ввиду близости используемой трассы к направлению поперёк оси диполя, из формул (1) и (2) следует, что азимутальной компонентой H_φ при расчёте полного поля в рассматриваемом эксперименте можно пренебречь. Поэтому воспользуемся только формулой (2). Частотная зависимость проводимости земли под источником

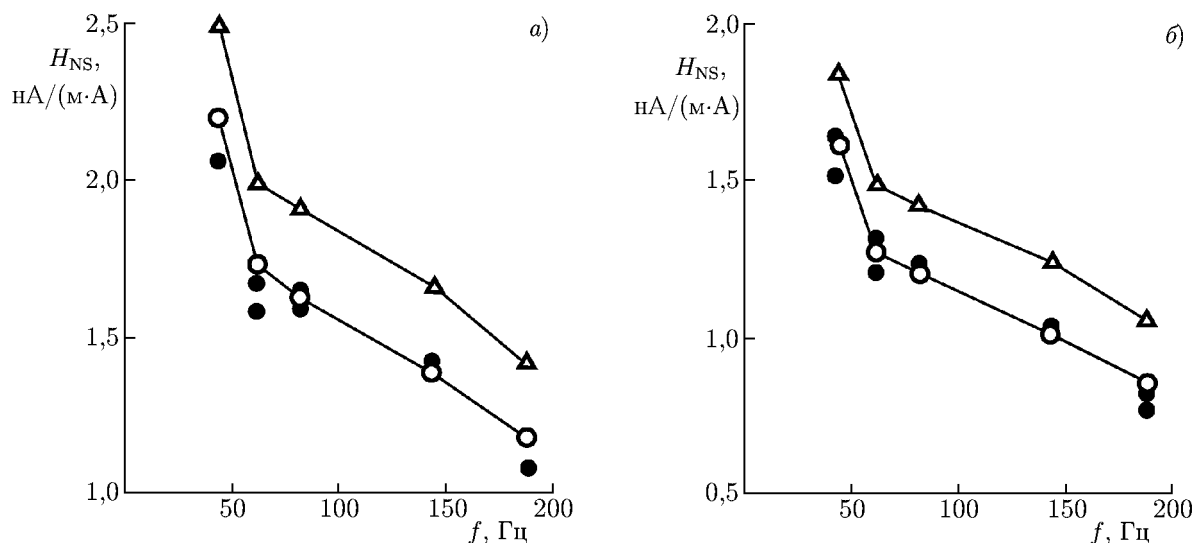


Рис. 4. Результаты расчётов и измерений компоненты магнитного поля H_{NS} в г. Петрозаводске (а) и д. Сторожно (б). Величина H_{NS} нормирована на силу тока. Символы \bullet обозначают экспериментальные данные, Δ и \circ — теоретические оценки с использованием параметров Баннистера и уточнённых параметров соответственно

σ_e показана на рис. 3; высота волновода h выбирается такой же, как в работе [6] (табл. 1), отношение скорости света в вакууме к фазовой скорости сверхнизкочастотной волны в волноводе c/v и коэффициент затухания с расстоянием волны в волноводе α определены с учётом влияния низкопроводящей земли на трассе распространения излучения (табл. 3).

Результаты измерений и расчётов поля представлены на рис. 4. Также для сравнения приводятся расчётные кривые, полученные для типичных параметров распространения (табл. 1). Из рис. 4 видно, что учёт особенностей возбуждения (частотной дисперсии проводимости земли под источником) и распространения излучения над низкопроводящей землёй даёт лучшее согласие расчётов с измерениями.

4. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ СВЕРХНИЗКОЧАСТОТНОГО ПОЛЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ДИПОЛЯ В ВОЛНОВОДЕ ЗЕМЛЯ–ИОНОСФЕРА

В экспериментальных исследованиях сверхнизкочастотных полей на больших расстояниях, как правило, пренебрегают радиальной компонентой, считая $H_\tau \approx H_\varphi$, где H_τ — горизонтальная компонента магнитного поля. Упрощение теоретического описания поля делает более наглядными интерпретацию его измерений и анализ зависимости поля от параметров возбуждения и распространения излучения в волноводе. Рассмотрим более подробно эту возможность и найдём по формулам (1) и (2) области на поверхности Земли, где вклад одной из компонент в полное горизонтальное поле H_τ пренебрежимо мал.

В качестве критерия выберем величину максимальной относительной погрешности определения амплитуды полного поля 10%. Расчёты для частот 30; 82 и 300 Гц и расстояний вплоть до близких к антиподным в первой четверти полярной системы координат дают области, показанные на рис. 5. В расчётах горизонтальный электрический диполь расположен в начале координат, ось диполя совпадает с полярной осью $\varphi = 0$. Обратная кругосветная волна не учитывается. Как видно из рис. 5, на больших расстояниях от источника компоненту H_φ действительно можно считать основной и, рассматривая полное горизонтальное поле H_τ , пренебрегать компонентой H_ρ .

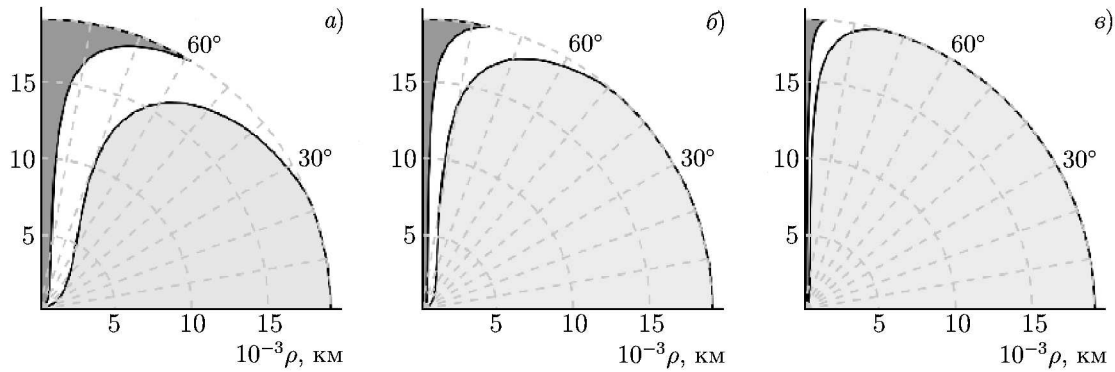


Рис. 5. Зоны преобладания одной из компонент в полном горизонтальном поле для расстояний $\rho < 19 \cdot 10^3 \text{ км}$ при $f = 30 \text{ Гц}$ (а), $f = 82 \text{ Гц}$ (б), $f = 300 \text{ Гц}$ (в). Светло-серым цветом обозначены области $H_\varphi \geq 0,9H_\tau$, тёмным — $H_\rho \geq 0,9H_\tau$

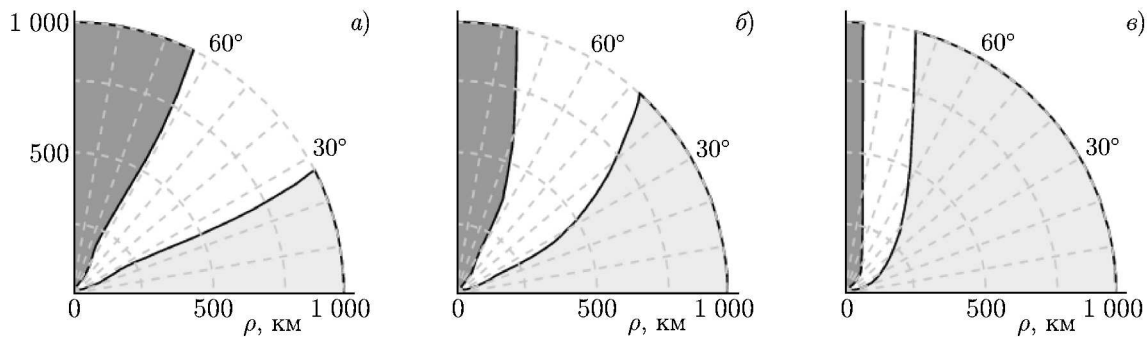


Рис. 6. Зоны преобладания одной из компонент в полном горизонтальном поле для расстояний $\rho < 1000 \text{ км}$ при $f = 30 \text{ Гц}$ (а), $f = 82 \text{ Гц}$ (б), $f = 300 \text{ Гц}$ (в). Светло-серым цветом обозначены области $H_\varphi \geq 0,9H_\tau$, тёмным — $H_\rho \geq 0,9H_\tau$

Но при приближении к перпендикуляру к оси диполя это допущение перестаёт быть справедливым, что в особенности заметно для низких частот.

По мере приближения к источнику конфигурация областей изменяется. На расстояниях менее 1000 км, характерных для рассматриваемого эксперимента, и на частотах менее 100 Гц размеры областей, где в полном поле преобладает одна из компонент, и третьей области, в которой необходимо учитывать обе составляющие, становятся сопоставимы друг с другом (рис. 6).

При выполнении условия $|k\rho| \gg 1$ формулы (1) и (2) значительно упрощаются:

$$|H_\varphi| \sim IL \sqrt{\frac{1}{8\pi\epsilon_0}} \frac{\omega}{c} \frac{\exp(-\alpha\rho)}{h \sqrt{\sigma_e(c/v)}} \frac{|\cos \varphi|}{\sqrt{a \sin(\rho/a)}}, \tag{7}$$

$$|H_\rho| \sim IL \sqrt{\frac{1}{8\pi\epsilon_0}} \frac{\exp(-\alpha\rho)}{h(c/v)^{3/2} \sqrt{\sigma_e}} \frac{|\sin \varphi|}{[a \sin(\rho/a)]^{3/2}}. \tag{8}$$

Типичные суточные вариации параметров распространения сверхнизкочастотных волн [6] согласно оценкам по формулам (7) и (8) в общем случае могут обуславливать изменения поля на заметную величину (от 15 до 30%), что можно использовать для мониторинга состояния ионосферы.

Из формул (7) и (8) также можно получить полезное для практики следствие. По данным измерений в области, где амплитуды H_φ и H_ρ сопоставимы (центральные неокрашенные зоны на рис. 5 и 6), имеется возможность определять фазовую скорость волны v из отношения

$$\left| \frac{H_\varphi}{H_\rho} \right| \approx \frac{\omega}{v} a \sin(\rho/a) |\operatorname{ctg} \varphi|$$

при $|k\rho| \gg 1$. Использование этого способа на практике для определения величины v или для наблюдения за её вариациями ограничено сверху расстоянием, на котором отношение сигнал/шум для обеих компонент позволяет оценивать величину v с необходимой точностью.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отличие от большинства предшествующих работ, в данном эксперименте были проведены измерения горизонтального магнитного поля наземного контролируемого СНЧ источника на дистанции средней протяжённости 700÷900 км в направлении, перпендикулярном к излучающей антенне. Геометрические условия эксперимента впервые позволили уделить основное внимание радиальной компоненте поля и получить новый экспериментальный материал для исследования распространения радиоволн сверхнизких частот в волноводе Земля—ионосфера. При интерпретации результатов измерений были учтены основные факторы, влиявшие на возбуждение и распространение СНЧ волн в данных условиях. Это позволило уточнить параметры распространения волн по сравнению с широко используемыми в литературе величинами. Изменения связаны с тем, что на трассе распространения средняя эффективная проводимость земли имеет довольно низкое значение порядка 10^{-5} См/м и оказывается сопоставимой с проводимостью ионосферы, что обычно не наблюдается на большинстве протяжённых трасс при усреднении их свойств.

На основе существующих представлений были определены границы областей применимости часто используемого приближения поля горизонтального электрического диполя в дальней зоне единственной азимутальной составляющей H_φ , а также значительно меньшие области, где основной является компонента H_ρ . Показано, что в областях, где возможно одновременное измерение двух компонент поля, из их отношения можно определять фазовую скорость волны в волноводе.

Чувствительность к условиям распространения измеряемых полей наземного контролируемого сверхнизкочастотного источника подтверждает возможность и целесообразность регулярных наблюдений и продолжения комплексных исследований в области мониторинга ионосферы и состояния земной коры.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 13-05-12005 офи_м).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кононов Ю. М., Жамалетдинов А. А. // Радиоэлектроника и телекоммуникации. 2002. № 2. С. 4.
2. Жамалетдинов А. А. // Докл. АН. 2011. Т. 438, № 4. С. 538.
3. Saraev A. K., Shlykov A. A. // Proc. 73rd European Association Geosci. Engineers Conf. Exhibition 2011: Unconventional Resources and the Role of Technology. Vienna, Austria, 23–26 May, 2011. P. 4335.
4. Терещенко Е. Д., Сидоренко А. Е., Григорьев В. Ф. // Физика Земли. 2014. № 1. С. 114.
5. Сараев А. К., Пертель М. И., Кочеров А. Б. и др. // Вопросы геофизики. 2004. Вып. 36. С. 102.
6. Bannister P. R. // Radio Sci. 1986. V. 21, No. 3. P. 529.

7. Porrat D., Fraser-Smith A. C. Propagation at Extremely Low Frequencies. Stanford: Stanford University, 2003. 42 p.
8. Башкуев Ю. Б., Хаптанов В. Б., Ханхараев А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 12. С. 1017.
9. Fraser-Smith A. C., Bannister P. R. // Radio Sci. 1998. V. 33, No. 1. P. 83.
10. Yano M., Ida Y., Hobara Y., et al. // Radio Sci. 2010. V. 45. Art. no. RS1009.
11. Galejs J. Terrestrial Propagation of Long Electromagnetic Waves. NY: Pergamon Press, 1972. 362 p.
12. Greifinger C., Greifinger P. // Radio Sci. 1978. V. 13, No. 5. P. 831.
13. Casey J. P. Extremely Low Frequency (ELF) Propagation Formulas for Dipole Sources Radiating in a Spherical Earth Earth-Ionosphere Waveguide. NUWC-NPT Technical Report 11,369. Naval Undersea Warfare Center Division. Newport, Rhode Island, USA, 2002. 186 p.
14. Вешев А. В. Электропрофилирование на постоянном и переменном токе. Л.: Недра, 1980. 391 с.
15. Терещенко Е. Д., Полуянов С. В., Григорьев В. Ф. и др. // Физика Земли. 2012. № 9–10. С. 96.
16. Ковтун А. А. Строение коры и верхней мантии на северо-западе Восточно-Европейской платформы. Л.: ЛГУ, 1989. 284 с.

Поступила в редакцию 29 декабря 2014 г.; принята в печать 12 июля 2015 г.

**RADIAL COMPONENT OF THE SUPER-LOW-FREQUENCY MAGNETIC
FIELD OF A HORIZONTAL ELECTRIC DIPOLE AT LOW CONDUCTIVITY
OF THE GROUND ALONG THE PROPAGATION PATH**

E. D. Tereshchenko, A. E. Sidorenko, V. F. Grigoryev, and P. E. Tereshchenko

We study the super-low-frequency field of a grounded horizontal electric dipole at a high-latitude submeridional path having a length of up to 1000 km. Unlike most of the earlier works, this paper considers the case of wave propagation transversely to the dipole axis, where the main component of the magnetic field is radial. The frequency dispersion of the ground conductivity under the source, which determines the coefficient of excitation of the Earth–ionosphere waveguide, is found from the measurements of the field at a distance of three heights of the ionosphere. Typical parameters of propagation of super-low-frequency waves are refined allowing for specific features of the path used in the experiment. The significance of allowing for ground conductivity as the radiation propagates along low-conductivity regions is demonstrated. The regions, where one of the magnetic-field components is predominant, is calculated in a polar system of coordinates linked to the source, as well as the regions, where the both components should be allowed for. The theoretical possibility of determining the phase velocity of the wave basing on the ratios of the magnetic-field components measured at long distances.