

УДК 537.876.23

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ
НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ, ГЕНЕРИРУЕМОГО В
ВОЗМУЩЕННОЙ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ**

А. В. Мошков, В. Н. Пожидаев

Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН

125009, Москва, ул. Моховая 11, корп.7

Статья поступила в редакцию 12 октября 2017 г.

Аннотация. На основе спутниковых экспериментальных данных о параметрах демодулированного низкочастотного излучения мощного передатчика станции HAARP (Аляска, США) проведено численное моделирование возможного распределения поля такого источника в волноводе «Земля-ионосфера». Показано, что в связи с чрезвычайно слабой электромагнитной связью ионосферы и волновода в случае ионосферного источника, величины напряженности электрического и магнитного поля волноводных волн относительно малы и находятся вблизи уровня низкочастотных помех уже в непосредственной близости к центру распределения. Это приводит к необходимости использования специальных процедур для обнаружения такого сигнала и измерения его параметров в целях дистанционной диагностики работы мощных наземных ионосферных станций.

Ключевые слова: высокоширотная ионосфера, нагревной стенд, волновод «земля-ионосфера», демодулированные волны низкой частоты, лучевые траектории.

Abstract. Modern scientific programs for studying the Earth's ionosphere and magnetosphere usually include injection of low-frequency (LF) electromagnetic waves into these plasma media. Note that the development of high-power ground antennas radiating upward is hampered because of relatively large dimensions of such antennas and rather high conductivity of ground at low frequencies. This circumstance has led to building in the late 1960s of Siple Antarctic station

located on thick ice substrate. However, at present, the technology of formation of LF sources on the basis of demodulation of high-power short-wave radiation of ground-based transmitters located in North polar regions is preferable. Modern station acting on the ionosphere is a system that can not only act intensively on the ionospheric plasma but also control the conditions and parameters of this action. Currently, the EISCAT (Norway) and HAARP (Alaska) heating facilities are the most powerful and best equipped with scientific control instruments. It can be shown that, in the first approximation, this antenna is equivalent to an electric dipole oriented from the east to the west in the geomagnetic coordinate system. Some part of the radiation of such an antenna passes into the upper ionosphere and magnetosphere. Another part of the LF radiation enters a spherical cavity formed by the lower boundary of the ionosphere and the Earth's surface (the so-called Earth-ionosphere wave guide). In this spherical wave channel, LF waves can propagate through distances of about several thousand kilometers; these waves are recorded by ground-based receiving instruments. The objective of this paper is to numerically estimate the structure and strength of the demodulated LF radiation propagated in the wave guide for the case of HAARP transmitter operation modes. It is shown that the Earth-ionosphere guide has a very low electromagnetic connectivity with an ionosphere sources in a frequency range 1...5 kHz due to relatively high optical density of the ionosphere plasma in this range. A wave guide field strength decays with rate $\sim 10...15$ dB per 100 km on distances about 100...200 km from the field strength earth distribution maxima. In a distance ~ 500 km this decay rate has a "traditional" value 1...2 dB per 1000 km average field strength value is several mkV/m.

Key words: high-latitude ionosphere, heating facility, demodulated low-frequency waves, ray tracing.

1. Введение

Современные научные программы по изучению ионосферы и магнитосферы Земли содержат, как правило, инъекцию электромагнитных волн низкой частоты (НЧ) в эти плазменные среды. В широком смысле низкие частоты f соответствуют интервалу от долей герц до $f \leq f_H/2$, где f_H – локальное

значение гирочастоты электронов. На средних широтах в ионосфере $f_H \sim 1\text{МГц}$. Отметим, что создание мощных наземных излучающих вверх антенн затруднено из-за их относительно больших размеров и относительно высокой проводимости поверхности земли на низких частотах. Это обстоятельство постоянно стимулирует поиски физических механизмов, позволяющих обойти эту трудность. Например, в настоящее время предпочтение отдают технологии создания НЧ-источников на основе демодуляции мощного модулированного коротковолнового (КВ) излучения наземных передатчиков, расположенных в северных полярных районах [1-3]. Современная станция воздействия на ионосферу представляет собой комплекс аппаратуры, позволяющий не только активно воздействовать на ионосферную плазму, но и одновременно контролировать условия и параметры такого воздействия. В настоящее время в мире функционирует более 10 таких станций, наиболее мощными и оснащенными научной аппаратурой из которых являются станции EISCAT (Норвегия) и HAARP (Аляска) [2,3].

Принцип работы ионосферных излучателей основан на известном эффекте Гетманцева [4]. Возмущенная область ионосферы играет роль демодулятора и, соответственно, НЧ излучающей антенны [5]. Можно показать, что в первом приближении такая антенна эквивалентна электрическому диполю, ориентированному с востока на запад в геомагнитной системе координат [6]. Часть излучения такой антенны уходит в верхнюю ионосферу и магнитосферу, где может быть зарегистрирована бортовыми приемными устройствами искусственного спутника Земли (ИСЗ). Другая часть НЧ-излучения выходит в сферическую полость, образованную нижней границей ионосферы и земной поверхностью (так называемый волновод «Земля–ионосфера»). В этой полости НЧ-волны могут распространяться на расстояния порядка нескольких тысяч километров, где возможна их регистрация наземными приемно-измерительными устройствами.

Цель данной работы – расчеты наземного распределения напряженности поля демодулированных НЧ-волн в волноводе «Земля-ионосфера» и оценка

параметров этого распределения. В качестве начальных данных для таких расчетов использовали результаты спутниковых измерений параметров восходящего НЧ-излучения [7], а также данные численного моделирования структуры такого излучения [5,8].

2. Модель ионосферы и параметры источника

Для определенности будем соотносить используемые модели среды и параметры передатчика с условиями работы станции HAARP, поскольку ее характеристики и сведения о сопутствующих наземных и орбитальных измерениях параметров НЧ-сигналов достаточно полно опубликованы в литературе. Положение передатчика соответствует значению геомагнитной широты $\Phi \sim 60^\circ$ и углу наклона геомагнитного поля к северу от вертикали $\sim 16^\circ$. Частота несущей может изменяться от 2,75 до 9,5 МГц. В зависимости от частоты и режима работы фактически излучается КВ-мощность в среднем ~ 3 МВт и с учетом диаграммы направленности она может достигать 1 ГВт. Частота модуляции составляет от 0,5 до 5 кГц и в ходе эксперимента может меняться со временем по заранее выбранному закону.

Измерения ряда характеристик демодулированного НЧ-излучения удалось провести, используя изначально не предназначенный для этой цели спутник европейского проекта DEMETER [9]. Спутник запущен 29 июня 2004 г. для проведения мониторинга НЧ электромагнитного поля Земли, например, аномалий, вызванных землетрясениями, вулканическими процессами и деятельностью людей. Спутник выведен с орбиты 17 марта 2012 г. Высота полета спутника составляла ~ 670 км, наклонение орбиты $\sim 98,3^\circ$, средняя горизонтальная орбитальная скорость $\sim 7,6$ км/с. Измерения электрического и магнитного НЧ-поля передатчика HAARP проводили в 2007 г. [7].

Для расчетов мы выбрали эмпирическую модель ионосферы, которая соответствует полярной ночи в период равноденствия при повышенной активности Солнца [10]. В ночной приполярной нижней ионосфере зависимость величины концентрации электронов N_e от значения высоты h над поверхностью земли в большой степени определяется интенсивностью потоков

высыпающих электронов (локальной геомагнитной активностью). Поэтому высотный профиль $N_e(h)$ в приполярной нижней ионосфере очень изменчив.

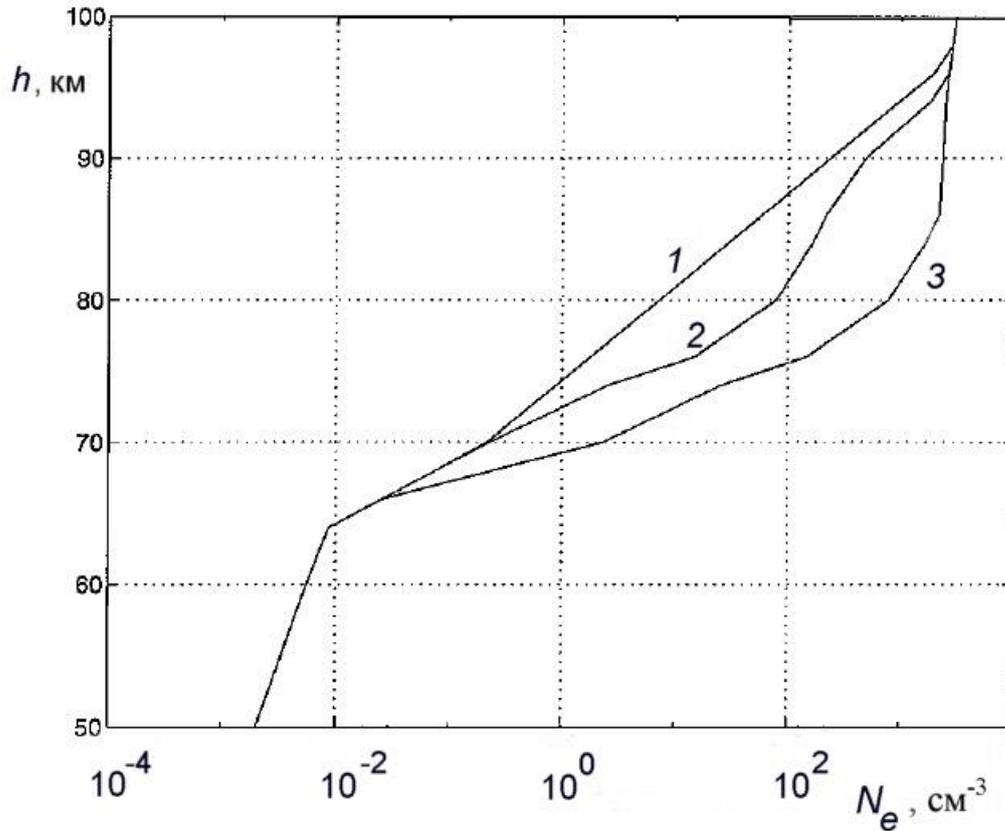


Рис.1. Зависимость концентрации электронов N_e в приполярной нижней ионосфере от высоты h для различных степеней естественных возмущений.

На рис.1 приведены три характерных профиля, соответствующих нормальной (кривая 1), средней (кривая 2) и повышенной (кривая 3) геомагнитной активности. Из рисунка видно, что увеличение концентрации электронов вблизи высоты 85 км может достигать почти двух порядков. Ниже при расчетах будем предполагать, что кроме электронов в нижней ионосфере есть только один сорт ионов – положительно заряженные ионы кислорода.

На высотах $\sim 70\dots 100$ км градиент концентрации электронов N_e относительно велик. Этот параметр, наряду с величиной напряженности геомагнитного поля B_0 , определяет поведение НЧ электромагнитных волн в ионосфере. Если на длине волны величина N_e изменяется достаточно сильно, то приближение геометрической (лучевой) оптики, широко применяемое для расчетов характеристик распространения НЧ-радиоволн в ионосфере и

магнитосфере Земли, может нарушаться. В этом случае для расчета векторных компонентов поля необходимо применять сложные вычислительные процедуры, основанные на прямом численном интегрировании волновых уравнений Максвелла (смотри, например, [5]).

В данной работе применен лучевой метод в «усеченном» варианте. Траектория распространения сигнала вычисляется лучевым методом. При этом амплитуду сигнала или коэффициенты отражения и прохождения в неоднородной плазме можно вычислить независимо, интегрируя волновые уравнения [11-13]. Отсюда следует, что в случае узких пучков лучевых траекторий относительную амплитуду НЧ-сигнала вдоль лучевых трубок можно корректно оценить, исходя только из данных о расходимости лучей в пространстве.

Для моделирования процессов распространения НЧ-волн в приближении холодной неоднородной магнитоактивной плазмы существует хорошо развитый аппарат численного анализа [14-17], который в данной работе использован для вычисления демодулированного НЧ-поля в волноводе «Земля-ионосфера».

Для построения лучевых траекторий выберем хорошо известную дипольную модель геомагнитного поля $\vec{B}_0(\vec{r})$ и связанную с ней сферическую систему координат. Ее центр совпадает с центром Земли, и ось проходит через геомагнитные полюсы. Радиус-вектор \vec{r} произвольной точки в пространстве имеет вид $\vec{r} = \{R, \theta, \Lambda\}$, где R - расстояние от центра Земли, $\theta = 90^\circ - \Phi$, и Φ, Λ – геомагнитные широта и долгота соответственно. Для интегрирования системы лучевых уравнений в форме [17], наиболее подходящей для наших целей, требуется дважды дифференцируемая аппроксимация эмпирического профиля $N_e(h)$ и, соответственно, модели распределения $N_e(\vec{r})$ возмущенной области. Профиль $N_e(h)$ мы аппроксимировали при помощи кубических сплайнов. Для простоты будем считать, что на «регулярный» профиль $N_e(h)$ аддитивно накладывается возмущенный профиль нижней ионосферы $N_c(\vec{r})$

(кривая 3 на рис.1), в котором и происходит интенсивное поглощение мощного КВ-излучения.

Отметим, что в настоящее время нет законченной теории формирования внутренней структуры области нижней ионосферы, интенсивно поглощающей мощное модулированное КВ-излучение при наличии авроральных токов. Экспериментальные исследования таких областей имеют косвенный характер, поскольку при прямых исследованиях ионосферы на высотах 70...90 км возникают серьезные технические трудности. Для расчетов используем ранее сформулированную нами упрощенную модель возмущенной области [8].

Совместное действие трех факторов: анизотропии среды, горизонтальной неоднородности фоновой плазмы и градиента ионизации N_e в возмущенной области приводит к формированию наземного распределения электромагнитного поля демодулированного пучка НЧ-волн, распространяющихся от возмущенной области вниз.

На рис.2 схематично изображен пучок лучей НЧ-волн частоты 2,5 кГц, распространяющихся вниз от возмущенной области до условного уровня горизонтальной нижней границы ионосферы $H_n \approx 60$ км. Возмущенная область расположена на высоте $H_0 = 75$ км [8]. Нижняя граница рисунка соответствует уровню земли. Ионосфера является плоскостной плазмой, расположенной в геомагнитном поле. На рис.2 видно, что лучи группируются в так называемый «конус Стори» вокруг локальной силовой линии геомагнитного поля. Показатель преломления n НЧ-волн частоты 1...5 кГц в области демодуляции может намного превышать 1. По закону Снеллиуса большинство лучей испытают полное внутреннее отражение и не выйдут в волновод «Земля-ионосфера». На рис.2 утолщенной кривой показан «центральный» луч, который выходит из ионосферы вертикально вниз. Известно (смотри, например, [28]), что такому лучу соответствует траектория

$$r/\cos^4\Phi = \text{const.}$$

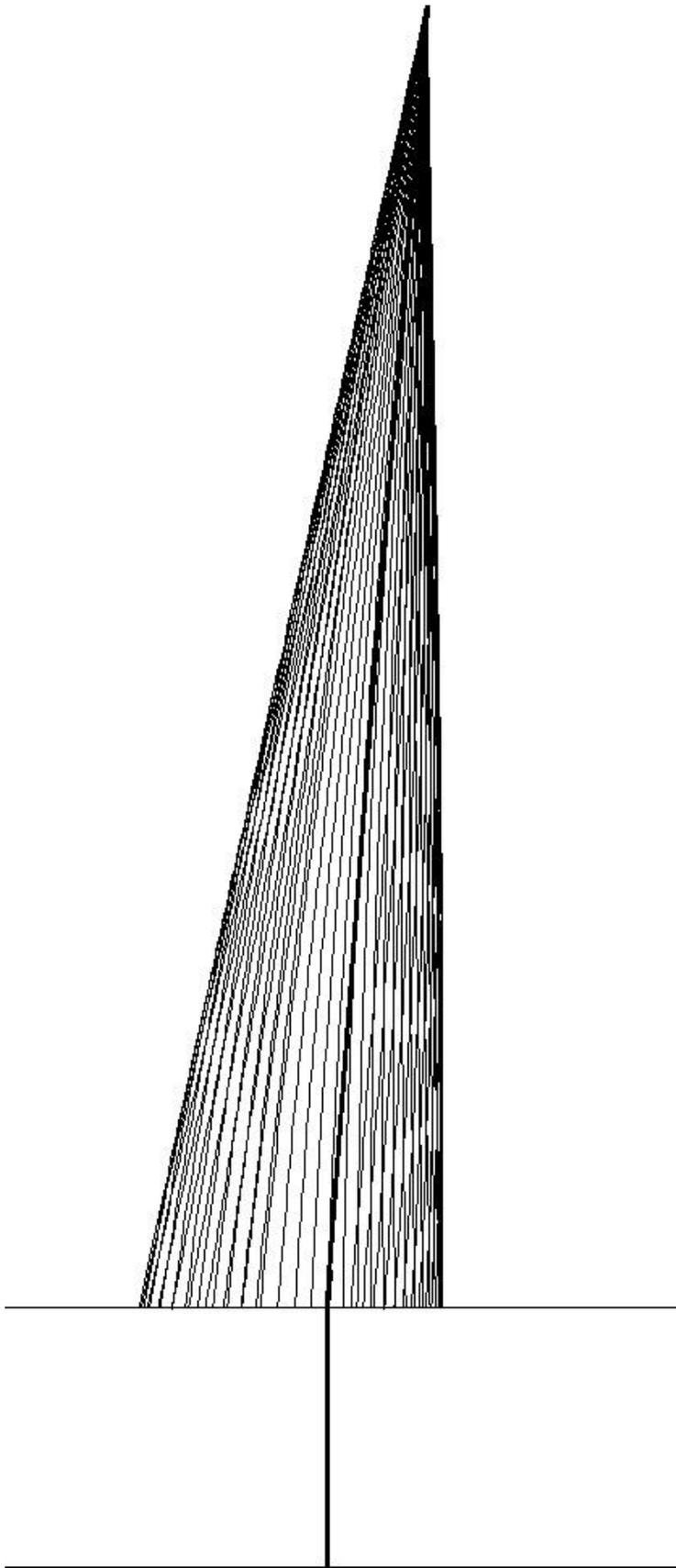


Рис.2. Лучевой конус демодулированных НЧ-лучей, распространяющихся от источника вниз к земной поверхности. Для иллюстрации приведены 50 лучей, заполняющих конус.

Остальные лучи, проникающие в волновод, образуют вокруг центрального луча узкую лучевую трубку, которая тем уже, чем больше величина n у источника. Можно показать [13,18], что в этом случае для вычисления напряженности поля на поверхности земли достаточно знать только один из параметров НЧ-источника – величину Γ , численно равную мощности, излучаемой в единицу телесного угла в направлении волновой нормали вертикально вниз. Данные об угловых параметрах лучевых конусов (рис.2) и данные теоретических и экспериментальных оценок величины излучаемой мощности [5,7], позволяют сделать оценки величины Γ для экспериментов HAARP 2007 г. Например, для частот 1, 2,5 и 5 кГц при мощности излучения 1,5 Вт получим соответствующие оценки величины Γ : 4,79; 4,95 и 5,10 Вт/стер. Для указанных частот в области возмущения величины показателя преломления округленно составляют 80, 30 и 20. Оценим отношение телесного угла, образуемого прошедшими в волновод лучами, и полного телесного угла излучения вниз. Для указанных частот эти отношения равны соответственно $4,0 \cdot 10^{-3}$; $1,1 \cdot 10^{-2}$ и $2,7 \cdot 10^{-2}$. Эти величины малы в сравнении с единицей, что позволяет говорить об относительно слабой электромагнитной связи ионосферы и волновода «Земля-ионосфера» в случае НЧ-источника, расположенного в ионосфере.

3. Результаты расчетов

Расчеты проводились для трех характерных частот: 1, 2,5 и 5 кГц. Эти частоты, во-первых, образуют интервал модулирующих частот HAARP. Во-вторых, частота 1 кГц меньше, а 5 кГц – больше частоты отсечки волновода «Земля-ионосфера». Сравнение характеристик дистанционно измеренных наземных НЧ-волн на этих частотах делает результаты таких измерений более информативными. Для вычисления поля волны в точке x на поверхности земли использовалась процедура, основанная на методе скачков, который состоит в суммировании вклада парциальных лучей, испытавших 0, 1, 2... отражений от ионосферы и поверхности земли. При этом для вычисления коэффициентов отражения от ионосферы использовалась процедура численного

интегрирования волновых уравнений в нижней ионосфере, аналогичная описанной в [13].

На рис.3 приведено распределение вдоль поверхности земли компонента E_z поля волны для частот 1, 2,5 и 5 кГц (кривые 1-3 соответственно). Ось x правой наземной декартовой системы координат направлена на геомагнитный север. Ось z направлена вертикально вверх и значения на ней численно совпадают с высотой h над уровнем земли. Как известно, поверхность земли обладает высокой проводимостью в НЧ-диапазоне, поэтому в суммарном поле волны присутствует только компонент E_z электрического поля. Штриховая прямая обозначает вертикаль $x = 0$.

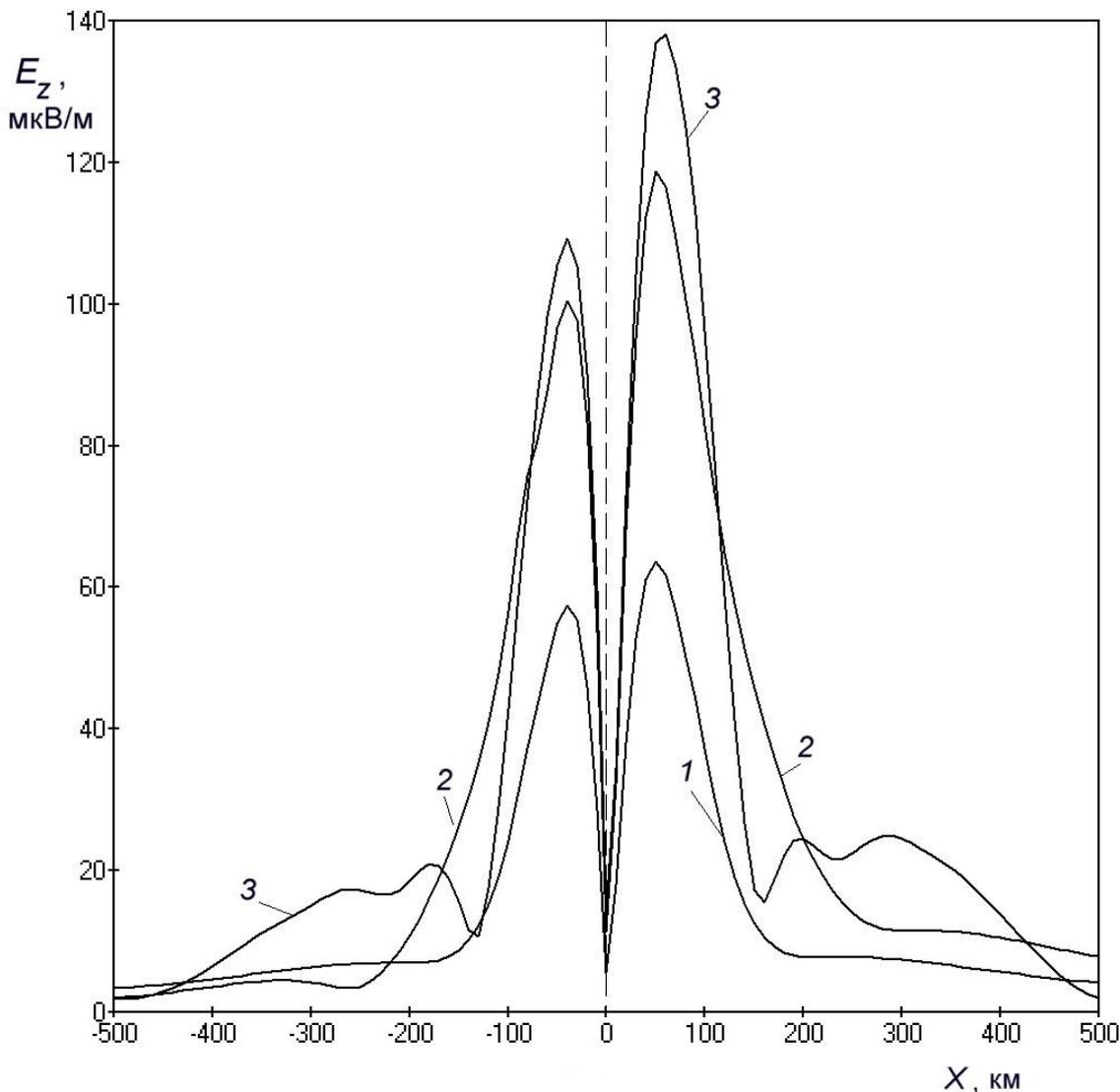


Рис.3. Наземное распределение компонента E_z электрического поля волны. Кривые 1-3 соответствуют частотам 1, 2,5 и 5 кГц.

Из рисунка видно, что в непосредственной близости «подспутниковой» точки $x \sim 0$ напряженность поля относительно быстро падает со скоростью ~ 15 дБ на 100 км. Это связано с тем, что длины волн в свободном пространстве для используемых частот равны 300, 120 и 60 км. В ближней зоне у поверхности земли поля ведут себя как квазистатические и спадают относительно быстро. При $x > 200 \dots 300$ км формируется средняя и дальняя волновые зоны. При $x > 500$ км НЧ волновые поля начинают спадать с расстоянием от источника с «классической» скоростью $1 \dots 2$ дБ / 1000 км. По этой причине интервал изменения x на рисунках ограничен отрезком $-500 \dots 500$ км.

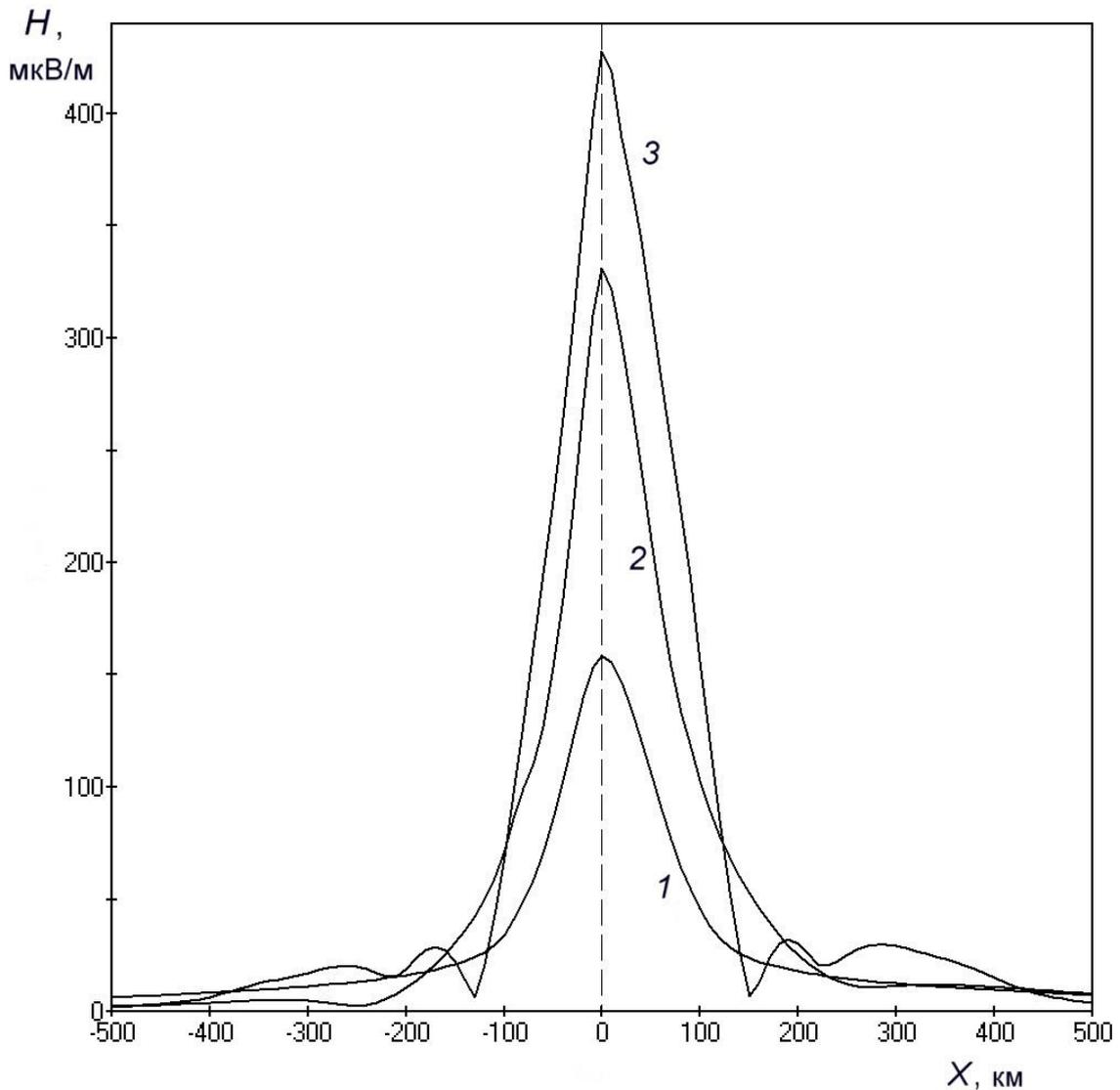


Рис.4. Наземное распределение величины H большой оси эллипса поляризации магнитного поля волны. Кривые 1-3 соответствуют частотам 1, 2,5 и 5 кГц.

На рис.4 изображены кривые распределения величины H большой оси эллипса поляризации магнитного поля НЧ-волны вдоль поверхности земли в формате, аналогичном рис.3. По традиции величина H приведена в единицах электрического поля. При необходимости перевода в единицы [А/м] можно использовать соотношение $E = Z_0 H$, где $Z_0 = 120\pi$ – импеданс вакуума.

Из рисунков 3 и 4 видно, что из-за слабой электромагнитной связи ионосферы и волновода «Земля-ионосфера» уже на расстоянии $x \sim 500$ км напряженность электромагнитного поля не превышает нескольких мкВ/м. Эти величины находятся вблизи порога естественных шумов в интервале частот 1...5 кГц. Дистанционный мониторинг таких сигналов требует специальных процедур обработки результатов волновых измерений [19].

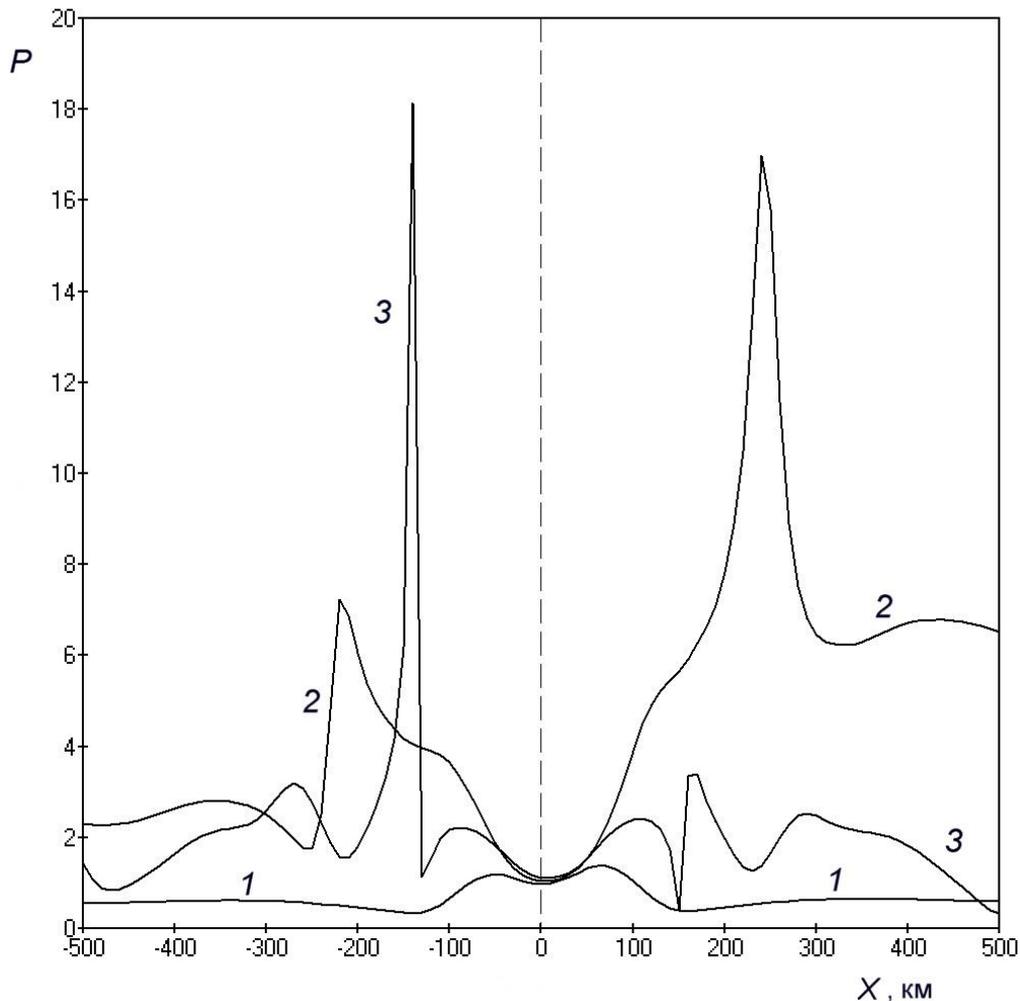


Рис.5. Наземное распределение величины модуля P поляризации волны. Кривые 1-3 соответствуют частотам 1, 2,5 и 5 кГц.

На рис.5 приведено наземное распределение модуля поляризации $P = H_y/H_x$, соответствующее рис.4. Из рисунка виден крайне неравномерный характер распределения поляризации на частотах 2,5 и 5 кГц (кривые 2,3), превышающих частоту отсечки волновода «Земля-ионосфера». Эта неравномерность обусловлена интерференцией суммируемых в каждой точке лучей, прошедших разный путь от источника и испытавших разное число отражений от анизотропной ионосферы. Чтобы не загромождать график, мы не приводим соответствующие значения аргумента поляризации, который распределен вдоль поверхности земли столь же неравномерно. Для волны с частотой 1 кГц (кривая 1) ситуация иная. Интерференционные эффекты выражены слабо, поляризация в окрестности центра распределения почти круговая, а с удалением от центра величина P колеблется в интервале 0,5...0,6, а ее аргумент – в интервале 50...70°.

4. Заключение

На основе теоретических и экспериментальных данных о параметрах демодулированных волн низкой частоты, образующихся в нижней приполярной ионосфере в результате ее возмущения излучением мощного КВ-передатчика станции HAARP (Аляска, США), проведены численные расчеты распределения поля НЧ волн вдоль поверхности земли в волноводе «Земля-ионосфера».

На основе результатов расчетов для частот 1, 2,5 и 5 кГц показано, что из всей мощности сигнала, излученной по направлению к земле, до поверхности доходит лишь относительно незначительная часть порядка нескольких процентов. Это связано с относительно высокой оптической плотностью возмущенной области ионосферы на указанных частотах.

Из результатов расчетов следует, что напряженность поля НЧ-волн распределена вдоль поверхности земли неравномерно. Максимальные значения напряженности поля приходятся на окрестность вертикальной проекции области демодуляции на поверхность. При удалении от этой области на расстояния 100...200 км напряженность поля быстро спадает со скоростью ~10...15 дБ на 100 км. В дальней зоне на удалении 500 км и более скорость

спада уменьшается до традиционных для волновода «Земля-ионосфера» величин 1..2 дБ/1000 км в диапазоне СДВ. К этому моменту, однако, величина напряженности поля составляет единицы мкВ/м, что близко к напряженности поля естественных низкочастотных электромагнитных шумов в волноводе «Земля-ионосфера». Следовательно, для удаленной регистрации таких колебаний следует применять специальные методы выделения нестационарного сигнала из помех.

Литература

1. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере. УФН. 2007. Т.177. № 11. С.1145-1177.
2. Белов А.С., Марков Г.А., Фролов В.Л. и др. Возмущения внешней ионосферы Земли мощным КВ радиоизлучением нагревного стенда EISCAT. Совр. Проблемы Дист. Зондирования Земли из космоса. 2008. Т.5. № 1. С.539-545.
3. Cohen M.B., Golkowski M. 100 days of ELF/VLF generation via HF heating with HAARP. Journal of Geophysical Research. Space Physics. 2013. V.118. No 10. P. 6597–6607. doi:10.1002/jgra.50558.
4. Васильев А.Н., Гетманцев Г.Г., Капустин И.Н. и др. Явление генерации электромагнитных волн ионосферными токами под воздействием на ионосферу модулированного коротковолнового радиоизлучения - эффект Гетманцева. Диплом на открытие №231. Регистр. 22. 05. 1980. // Открытия в СССР. М: Госкомитет СМ СССР по делам изобретений и открытий. ВНИИПИ, 1981. С. 25.
5. Lehtinen N.G., Inan U.S. Radiation of ELF/VLF waves by harmonically varying currents into a stratified ionosphere with application to radiation by a modulated electrojet. J. Geophys. Res. 2008. V.13, A06301. doi:10.1029/2007JA012911.
6. Cohen M.B., Golkowski M., Inan U.S. Orientation of the HAARP ELF ionospheric dipole and the auroral electrojet. Geophys. Res. Lett. 2008. V.35. L02806, doi: 10.1029/2007GL032424.

7. Piddyachiy D., Inan U.S., Bell T.F., Lehtinen N.G., Parrot M. DEMETER observations of an intense upgoing column of ELF/VLF radiation excited by the HAARP HF heater. *J. Geophys. Res.* 2008. V.113. A10308. doi:10.1029/2008JA013208.
8. Мошков А.В., Пожидаев В.Н. Пространственное распределение демодулированного низкочастотного поля в ионосфере, возмущенной мощным коротковолновым радиоизлучением. *РЭ*, 2013. Т. 58. №9. С. 965-970.
9. Palmer T.N., Alessandri A., Andersen U. et al. Development of a european multimodel ensemble system for seasonal-to-interannual prediction (DEMETER). *Bull. Amer. Meteorological Soc.* 2004. V. 85. № 6. P. 853-872.
10. Фаткуллин М.Н., Зеленова Т.И., Козлов В.К. и др. Эмпирические модели среднеширотной ионосферы. М.: Наука. 1981. 256с.
11. Макаров Г.И., Новиков В.В. Вопросы распространения сверхдлинных радиоволн в полноводном канале Земля-ионосфера. *УФН*. 1969. Т. 98. № 4. С.733-735.
12. Аксенов В.И., Лишин И.В., Назарова М.В. Распространение сверхдлинных радиоволн в ионосфере Земли. В сб. «Распространение радиоволн». М.: Наука, 1975. С.228-261.
13. Аксенов В.И, Мошков А.В. О напряженности поля на поверхности Земли от источника очень низкой частоты, расположенного в ионосфере. *Радиотехника и Электроника*. 1987. Т. 32. № 5. С. 913-921.
14. Казанцев А.Н., Лукин Д.С., Спиридонов Ю.Г. Метод исследования распространения радиоволн в неоднородной магнитоактивной ионосфере. *Космические исследования*. 1967. Т. 5. № 4. С. 593-600.
15. Лукин Д.С. Численное моделирование распространения сверхдлинных волн в магнитосфере Земли. *Нелинейный мир*. 2012. Т.10. № 10. С. 642-650.
16. Лукин Д.С., Савченко П.П. Численное моделирование структуры поля коротких волн в параболическом ионосферном слое. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1981. Т. 21. № 2. С. 256-282.

17. Аксенов В.И., Мошков А.В. Трехмерные лучевые траектории электромагнитных волн низкой частоты в магнитосфере Земли. Космические исследования. 1981. Т.19. № 6. С. 876-883.

18. Мошков А.В. Оценка величины напряженности поля низкочастотного ионосферного источника вблизи главного максимума распределения на поверхности земли. Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 12, С. 1436-1442.

19. Галушко В.Г., Буданов О.В., Ямпольский Ю.М. Квазиоптимальный алгоритм обнаружения узкополосных сигналов на фоне случайных помех. Радиофизика и радиоастрономия. 2003. Т. 8. № 4. С. 393-402.

Ссылка на статью:

А.В. Мошков, В.Н. Пожидаев. Распределение на поверхности земли напряженности поля низкой частоты, генерируемого в возмущенной нижней ионосфере. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct17/11/text.pdf>