

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 537.876.23

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕМОДУЛИРОВАННОГО НИЗКОЧАСТОТНОГО ПОЛЯ В НИЗКОШИРОТНОЙ ВОЗМУЩЕННОЙ ИОНОСФЕРЕ

© 2017 г. А. В. Мошков*, В. Н. Пожидаев

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
Российская Федерация, 125009, Москва, ул. Моховая 11, корп. 7*

*E-mail: kuz@cplire.ru

Поступила в редакцию 06.10.2015 г.

Рассмотрены особенности распространения низкочастотных электромагнитных волн в ионосфере на низких широтах в случае, когда источником таких волн является процесс демодуляции излучения мощного коротковолнового наземного передатчика в нижней ионосфере. Расчеты проведены в лучевом приближении на основе разработанной для этого случая упрощенной модели низкоширотной экваториальной аномалии концентрации электронов. Показано, что широтные градиенты экваториальной аномалии могут привести как к дополнительной фокусировке, так и к дефокусировке пучка демодулированных низкочастотных волн.

DOI: 10.7868/S0033849417020085

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время проводят интенсивные исследования воздействия мощного модулированного коротковолнового (КВ) излучения наземных передатчиков на параметры околоземной космической плазмы (магнитосферы Земли). Ожидается, что указанное воздействие и его последствия могут быть тесно связаны с такими процессами, как локальные изменения климата и стабильность радиационных поясов Земли. В связи с этим актуальной является дистанционная радиофизическая диагностика параметров искусственных возмущений ионосферы Земли. В настоящее время в России соответствующие эксперименты практически не проводятся, поэтому основное внимание направлено на численное моделирование процессов, возникающих в возмущенной ионосфере и магнитосфере Земли. Отметим, что работа [1] посвящена анализу воздействия мощного модулированного КВ-излучения передатчика полярной станции HAARP (Аляска) на авроральный кольцевой ток в нижней ионосфере. Показано, что демодулированное низкочастотное (НЧ) излучение покидает высокоширотную ионосферу в виде узкого почти вертикального пучка. Возникло естественное предположение, что такой пучок может генерироваться в результате работы мощных передатчиков низкоширотных экваториальных нагревных станций (например, станда в Аресибо, Пуэрто-Рико) в областях нижней ионосферы, пронизываемых экваториальным кольцевым током.

Напомним, что принцип работы ионосферных демодуляторов основан на известном эффекте Гетманцева [2]. В нижней ионосфере в области прохождения горизонтального кольцевого тока существует интенсивное горизонтальное электрическое поле \vec{E} . В этой области мощный пучок коротких волн, модулированных НЧ-излучением, сильно поглощается. Возмущение участка нижней ионосферы приводит к НЧ-модуляции проводимости плазмы σ и, как следствие, к появлению НЧ-плотности тока $\vec{J} = \sigma \vec{E}$. В результате возникает вторичное излучение НЧ-волн. Таким образом, возмущенная область ионосферы играет роль демодулятора и, соответственно, НЧ-излучающей антенны. Отметим, что в широком смысле низкие частоты f соответствуют интервалу от долей герца до $f \leq f_H/2$, где f_H — локальное значение гирочастоты электронов. В ионосфере $f_H \sim 1$ МГц, однако особый интерес представляет изучение взаимодействия электромагнитных волн с энергичными частицами радиационных поясов, где величина f_H изменяется от единиц до десятков килогерц и, соответственно, низкие частоты соответствуют ОНЧ диапазону.

Цель данной работы состоит в создании на основе литературных данных простой модели низкоширотной ионосферы, пригодной для проведения расчетов лучевых траекторий НЧ-волн. При использовании этой модели проведены расчеты распределения демодулированных НЧ-волн. Поскольку соответствующие экспериментальные

данные к настоящему времени отсутствуют, расчеты имеют качественный и иллюстративный характер.

1. МОДЕЛЬ НИЗКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ

В современных мощных нагревных КВ-передатчиках применяется, как правило, частота модуляции в интервале 1...10 кГц. Для описания распространения таких НЧ волн достаточно иметь модель высотного и широтного распределения величины концентрации свободных электронов $N_e(h, \Phi)$, где h – высота над поверхностью земли, Φ – геомагнитная широта. Современные теоретические численные модели строения ионосферы весьма сложны и содержат решения систем десятков и сотен связанных уравнений, описывающих процессы ионизации, рекомбинации и динамики молекул и частиц ионосферных газов [3, 4]. Для целей данной работы наиболее подходит так называемое эмпирическое моделирование ионосферы, в ходе которого на основе обобщения экспериментальных данных удается построить модельные распределения N_e , которые адекватно отражают реальную ситуацию в зависимости от ряда гелио- и геофизических условий [5]. Набор этих условий хорошо известен. Это, как правило, сезон, время суток, широта и солнечная активность. На основе такого подхода создаются, например, известные стандартные модели International Reference Ionosphere (IRI).

Отметим, что величина активности Солнца традиционно измеряется при помощи эффективного числа видимых солнечных пятен (число Вольфа R). Кроме того, в литературе в основном используется более информативный параметр $F_{10.7}$ – поток радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см в единицах 10^{-22} Вт м⁻² Гц⁻¹ [5]. Низкая активность Солнца соответствует значениям $R < 100$ ($F_{10.7} < 100$); умеренная – значениям R и $F_{10.7} \sim 100$; высокая – R и $F_{10.7} \sim 200$.

На рис. 1 в качестве иллюстрации приведены типичные широтные вариации величины N_e в максимуме слоя F ионосферы в полдень (слева) и в полночь (справа) равноденственного сезона для различных уровней солнечной активности (кривые 1–3 соответствуют значениям $R \sim 10, 100$ и 200) [5]. Точками и крестиками обозначены усредненные данные ионосферных станций, расположенных примерно вдоль одного магнитного меридиана. Квадратики – данные ракетных измерений. Кружочки – значения, взятые из различных модельных профилей. По оси абсцисс отложена геомагнитная широта Φ .

В первом приближении можно считать, что на низких широтах все кривые $N_e(\Phi)$ симметричны относительно геомагнитного экватора (ось орди-

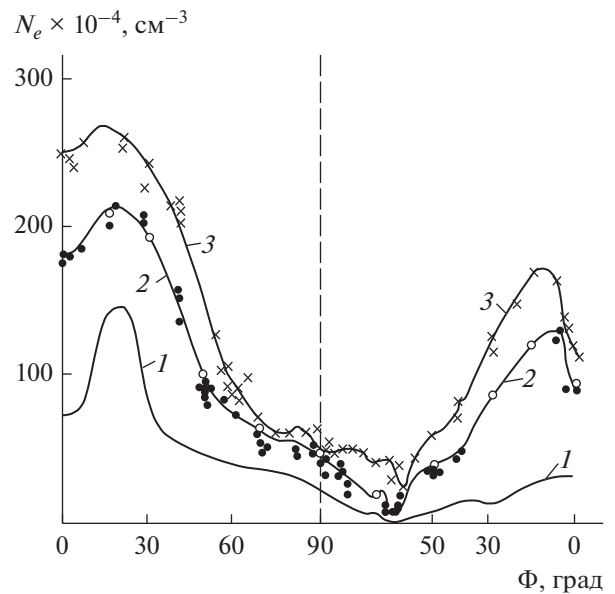


Рис. 1. Типичные изменения величины N_e в максимуме слоя F ионосферы в районе широтной аномалии (по данным [5]).

нат $\Phi = 0$) и имеют на экваторе минимум $N_m(0)$. Глобальные низкоширотные максимумы $N_m(\Phi_0)$ одинаковы по величине и расположены при $\Phi = \pm\Phi_0$ ($\Phi_0 > 0$). Указанные параметры низкоширотной аномалии зависят от гелио- и геофизических условий, их выбирают из модельных профилей [5], соответствующих условиям проведения расчетов.

Для аппроксимации кривых на рис. 1 мы выбрали простейшую аналитическую зависимость, удобную для проведения численных расчетов.

$$N_m(\Phi) = N_m(0) + \Delta\Phi^2[1 + (\Phi/\Phi_0)^4]^{-1}, \quad (1)$$

где множитель Δ имеет вид

$$\Delta \equiv 2[N_m(\Phi_0) - N_m(0)]/\Phi_0^2.$$

Например, для кривой 1 на рис. 1 имеем $\Phi_0 \sim 20^\circ$; $N_m(\Phi_0) \sim 1.5 \times 10^6$ см⁻³; $N_m(0) \sim 7.0 \times 10^5$ см⁻³. Зная, как зависит от широты величина концентрации электронов в максимуме слоя F, можем сконструировать весь профиль $N_e(h)$ для заданной широты, взяв за основу стандартный профиль, например, для широты 30° [5]. С точки зрения расчетов распространения НЧ-волн такое упрощение тем более оправдано, поскольку длина волны рабочих частот составляет 30...300 км в вакууме и порядка 5...50 км в ионосфере. При этом высота полета спутника не превышает 300...500 км. Таким образом, на трассе измерений укладывается порядка 10...100 длин волн, что позволяет в нашем случае пренебречь тонкой структурой профиля $N_e(h)$.

2. ОСОБЕННОСТИ НИЗКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ КАК СРЕДЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЧ-ВОЛН

Для иллюстрации особенностей распространения НЧ волнового пучка в низкоширотной ионосфере при наличии экваториальной аномалии выберем для аппроксимации (1) следующие параметры кривой I на рис. 1: $\Phi_0 \sim 20^\circ$; $N_m(\Phi_0) \sim 1.5 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$; $N_m(0) \sim 7.0 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$. Основное отличие приполярной возмущенной нижней ионосферы от аналогичной низкоширотной заключается в различной физической природе таких возмущений. Если в приполярной ионосфере источником возмущений являются повышенная геомагнитная активность и порожденные ею вторичные высыпания энергичных электронов внешних радиационных поясов, то в низкоширотной ионосфере основную роль играют мощные электромагнитные импульсы (ЭМИ) молниевых разрядов [6, 7].

Действительно, в среднем за сутки происходит около 2000 гроз, сопровождаемых заметными молниевыми разрядами. За секунду происходит 40...50 таких разрядов. Каждый момент времени грозы покрывают до 10% земной поверхности. Максимальная плотность гроз наблюдается в тропическом и субтропическом поясах Земли. Каждый молниевый разряд генерирует мощный ЭМИ в диапазонах частот НЧ-ОНЧ. Средний молниевый разряд сопровождается выделением энергии $\sim 10^9$ Дж в течение 0.1...0.2 мс. Из этой энергии около 10^6 Дж переходит в энергию ЭМИ, максимум спектра которого приходится на частоты 5...10 кГц, и в среднем за секунду выделяется энергия порядка $\sim 5 \times 10^{10}$ Дж. Таким образом, нижняя приэкваториальная ионосфера постоянно “пропускает” через себя десятки гигаватт электромагнитной энергии в относительно узком интервале низких частот. Можно сделать вывод, что приэкваториальная ионосфера (в отличие от приполярной) практически постоянно находится в “возбужденном” состоянии [7].

Энергия такого импульса частично уходит в волновод “Земля-ионосфера”, где распространяется на расстояния в несколько тысяч километров, пока уровень сигнала не достигнет естественного шумового фона. Другая часть энергии ЭМИ распространяется вверх, где взаимодействует с плазмой нижней ионосферы и нагревает ее. Эти восходящие потоки ЭМИ формируют свистящие атмосферерики в плазмосфере, которые в приэкваториальной области могут взаимодействовать с энергичными электронами внутренних радиационных поясов, приводя к их дополнительному высыпанию в нижнюю ионосферу.

При попытке спутниковых измерений на низких широтах следует учитывать важное обстоятельство, связанное с максимальной высотой ре-

гистрации сигнала. Действительно, даже при слабой рефракции в неоднородной среде лучи заключены в так называемый “конус Стори” вследствие анизотропии среды [8], и лучевые траектории стремятся следовать почти вдоль стартовой силовой линии геомагнитного поля. Чем ближе точка старта к геомагнитному экватору, тем ближе к земле силовая линия пересекает экваториальную плоскость. Пусть \vec{r} – радиус-вектор из центра Земли. Тогда уравнение силовой линии геомагнитного поля в дипольном приближении имеет вид [8]

$$r/[R_0 \cos^2(\Phi)] = \text{const}, \quad (2)$$

где $R_0 \approx 6370$ км – радиус Земли. Величину константы определяют координаты любой точки на данной силовой линии. Пусть силовая линия проходит через область демодуляции на высоте h и широте Φ . Тогда из соотношения (2) легко найти максимальную высоту h_m , на которой эта силовая линия пересекает экватор:

$$h_m = (R_0 \sin^2 \Phi + h) / \cos^2 \Phi. \quad (3)$$

Например, при $h = 70$ км и $\Phi = 10^\circ$ получим $h_m \approx 270$ км. Если учесть, что величина $N_e(h)$ ниже максимума слоя F в среднем растет с высотой, то рефракция дефокусирует пучок лучей, и оценка (3) является немного заниженной. Из сказанного можно сделать вывод, что для успешной бортовой регистрации демодулированных в нижней ионосфере на низких широтах НЧ волн необходимо иметь ИСЗ с экстремально низкой орбитой.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Геометрию задачи и характеристики ионосферного возмущения выберем, руководствуясь результатами расчетов в высокоширотном случае [1]. Расположим область демодуляции на высоте 70 км, а центр возмущения – на высоте 85 км, что соответствует максимальной фокусировке пучка НЧ лучей $f = 5$ кГц. Как и в работе [1], будем считать, что “регулярный” профиль $N_e(h)$ складывается с возмущенным профилем нижней ионосферы $N_e(\vec{r})$, в котором и происходит интенсивное поглощение мощного КВ-излучения. Наша цель – показать, что совместное действие трех факторов: анизотропии среды, горизонтальной неоднородности фоновой плазмы и градиента N_e в возмущенной области приводит к формированию экспериментально наблюдаемой сложной тонкой структуры демодулированного пучка НЧ-волн. Для этого мы выбрали простейшую сферически симметричную модель возмущенной области с гауссовской внутренней структурой [1]:

$$N_e(r_c) = N_{e0} \exp(-r_c^2 / 2\Delta r^2). \quad (4)$$

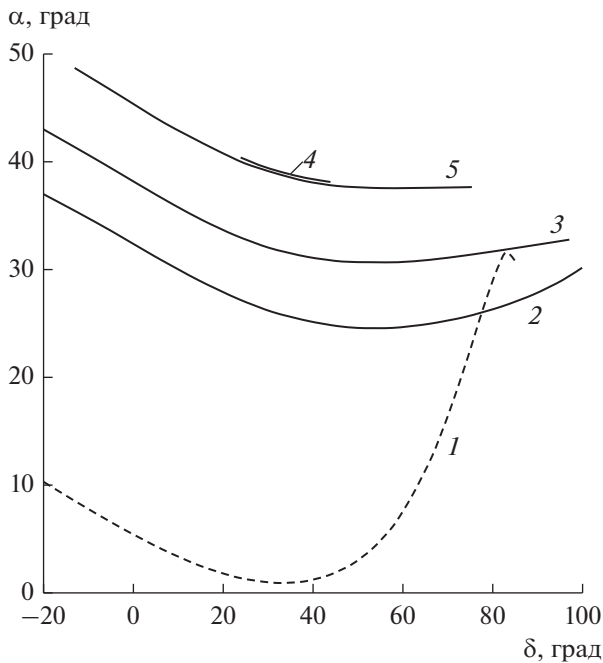


Рис. 2. Зависимость характера фокусировки лучей в пучке от положения источника в пределах главного максимума широтной аномалии.

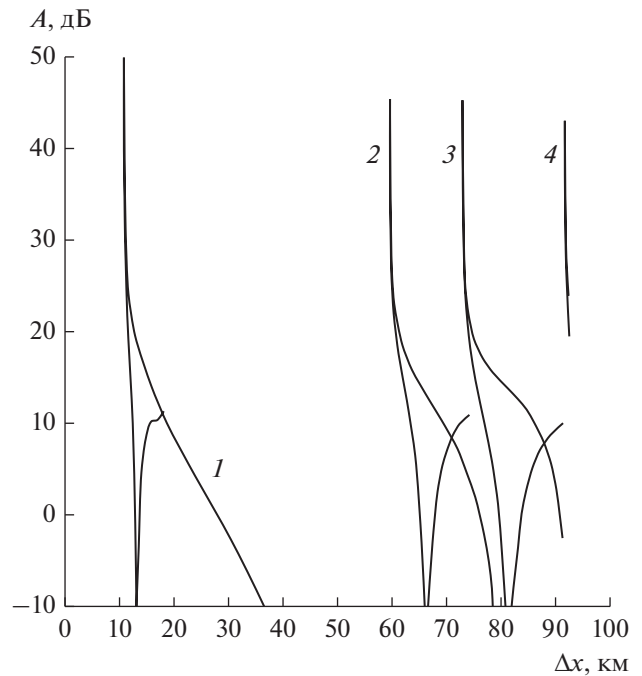


Рис. 3. Распределение относительной амплитуды пучка на высоте 180 км в зависимости от положения источника.

Параметр $\Delta r = 25$ км определяет условную “ширину” кривой: максимум градиента величины N_c соответствует расстоянию $r_c = \Delta r$ и уровню $0.6N_{c0}$, где N_{c0} – максимальное значение N_c . Как и в работе [1] предположим, что величина концентрации N_{c0} на два порядка превышает фоновое значение.

Для описания экваториальной аномалии электронной концентрации в качестве примера будем использовать часть кривой *I* слева на рис. 1. Видно, что в качестве начальных широт для процедуры построения лучевых траекторий удобно выбрать три: широту начала подъема кривой $\Phi_1 = 30^\circ$; широту максимального градиента этого подъема $\Phi_2 = 25^\circ$ и широту максимума кривой $\Phi_3 = 20^\circ$. Из каждой стартовой точки выходит пучок из 50 лучей, начальные углы волновых нормалей которых равномерно покрывают почти развернутый угол относительно локального направления \vec{B}_0 . Вследствие анизотропии среды лучи наклоняются к югу противоположно вектору \vec{B}_0 , собираясь в относительно узкий пучок. Из-за неоднородности возмущенной области ионосферы и самой ионосферы этот пучок имеет сложную внутреннюю интерференционную структуру и испытывает сильную фокусировку.

В качестве иллюстрации на рис. 2 приведена зависимость угла α луча с вертикалью на фиксированной высоте $h = 180$ км в нижней ионосфере от соответствующего начального угла δ волновой нормали с вертикалью. Кривые 2–4 соответству-

ют начальным точкам Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 . Кривая *I* соответствует начальной широте $\Phi = 60^\circ$ и приведена для сравнения с высокоширотным случаем. Для большей наглядности на рисунке приведена кривая 5, соответствующая высоте наблюдения $h = 150$ км. Из сравнения кривых 1–5 видно, что с уменьшением начальной широты в пределах низкоширотной аномалии кривые $\alpha(\delta)$ при $\delta > 50^\circ$ горизонтально уплощаются, что приводит к заметному увеличению фокусировки соответствующих частей общего волнового пучка. При старте лучей с широт $\Phi < \Phi_3$ широтный градиент экваториальной аномалии меняет знак (рис. 1, кривая *I*), что приведет, очевидно, к уменьшению фокусировки лучей, но на высотах, совершенно недоступных для наблюдения со спутника.

Демодулированный НЧ-пучок имеет сложную пространственную структуру из-за сильной неоднородности и анизотропии среды. Для таких пучков характерно наличие каустик и интерференционных эффектов [1]. На рис. 3 приведена зависимость относительной амплитуды волн A на высоте 180 км от величины Δx горизонтального смещения от широты источника. Из-за незначительных смещений волнового пучка по вертикали и горизонтали по сравнению с величиной радиуса Земли, рис. 3 приведен в прямоугольной декартовой системе координат. Кривые 1–4, как и ранее, соответствуют стартовым широтам 60° , Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 . На кривых рисунка отчетливо видны каустики

и острые интерференционные максимумы при общей ширине низкоширотных пучков ~20 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По литературным данным проанализированы основные особенности строения низкоширотной ионосферы с точки зрения их влияния на распространение электромагнитных НЧ-волн и на возможность удаленной от источника регистрации характеристик этих волн с борта ИСЗ. Для низкоширотной ионосферы характерно наличие так называемой экваториальной аномалии распределения электронов по высоте и широте. Влияние этих неоднородностей необходимо учитывать при анализе и интерпретации НЧ-сигналов, зарегистрированных бортовой приемной аппаратурой ИСЗ. Построена типичная модель распределения концентрации электронов, передающая основные особенности строения экваториальной аномалии с точки зрения распространения НЧ-волн для различного времени суток и разных уровней солнечной активности, пригодная для проведения вычислений лучевых траекторий.

Проведены расчеты для качественного определения влияния низкоширотных неоднородностей на параметры НЧ-сигнала, регистрируемого на борту ИСЗ. Показано, что в зависимости от расположения НЧ-демодулятора экваториальная аномалия может приводить как к дополнительной фокусировке демодулированного НЧ-пучка, так и к его дефокусировке. Связанные с таким перераспределением лучей многочисленные особенности типа каустик могут привести к резким изменениям уровня сигнала в ходе спутниковых

измерений. Кроме того, с уменьшением широты расположения возмущенной области ионосферы высота проникновения лучей в ионосферу значительно уменьшается. Для регистрации таких сигналов потребуются космические аппараты с низкой (до 200 км) высотой полета над уровнем земли, но, к сожалению, соответствующие экспериментальные данные низкоширотных спутниковых измерений отсутствуют.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мошков А.В., Пожидаев В.Н.* // РЭ. 2013. Т. 58. № 9. С. 965.
2. *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.
3. *Антонова Л.А., Иванов-Холодный Г.С.* Солнечная активность и ионосфера. М.: Наука, 1989.
4. *Angerami J.J., Thomas J.O.* // J. Geoph. Res. 1964. V. 69. № 21. P. 4537.
5. *Фаткуллин М.Н., Зеленова Т.И., Козлов В.К. и др.* Эмпирические модели среднеширотной ионосферы. М.: Наука, 1981.
6. *Inan U.S., Bell T.F., Rodriguez J.V.* // Geophys. Res. Lett. 1991. V. 18. № 4. P. 705.
7. *Blaes P.R.* Remote Sensing and Statistical Analysis of the Lightning-Ionosphere Interaction. Ph.D. Thesis. Stanford Univ., 2015. 116 p. http://vlf.stanford.edu/sites/default/files/publications/blaes_thesis.pdf
8. *Дэвис К.* Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973.