

Министерство обороны Российской Федерации
Российская академия наук
Совет по космосу РАН
Научный совет РАН по распространению радиоволн
Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского



*80-летию Метеорологического факультета, исторического предшественника
кафедры Технологий и средств геофизического обеспечения
и отдела Исследований гидрометеорологических процессов
ПОСВЯЩАЕТСЯ*

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

А.В. Мошков;

В.Н. Пожидаев

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

ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕМОДУЛИРОВАННОГО НИЗКОЧАСТОТНОГО ПОЛЯ В НИЗКОШИРОТНОЙ ВОЗМУЩЕННОЙ ИОНОСФЕРЕ

В последнее время в мире развернуты интенсивные исследования воздействия мощного модулированного коротковолнового (КВ) излучения наземных передатчиков на параметры околоземной космической плазмы (магнитосферы Земли). В настоящее время в России соответствующие эксперименты практически не проводятся. Поэтому основной упор делается на численное моделирование процессов, возникающих в возмущенной ионосфере и магнитосфере Земли. Отметим, что демодуляция мощного КВ излучения возможна не только при взаимодействии с авроральным кольцевым током [1], но и на низких геомагнитных широтах в областях нижней ионосферы, пронизываемых экваториальным кольцевым током. Напомним, что принцип работы ионосферных демодуляторов основан на известном эффекте Гетманцева [2]. При этом возмущенная область ионосферы играет роль низкочастотной (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 нижней ионосфере $f_H \sim 1$ МГц).

Цель данной работы состоит в разработке по литературным данным простой модели низкоширотной ионосферы и в проведении на ее основе расчетов распределения демодулированных НЧ волн, генерируемых в нижней ионосфере излучением мощного экваториального передатчика. Поскольку соответствующие экспериментальные данные к настоящему времени отсутствуют, расчеты носят качественный и иллюстративный характер.

Для намеченной цели наиболее подходит так называемое эмпирическое моделирование ионосферы, в ходе которого на основе обобщения экспериментальных данных удается построить модельные распределения N_e , которые в той или иной мере адекватно отражают реальную ситуацию в зависимости от ряда гелио- и геофизических условий [3]. Набор этих условий хорошо известен. Это, как правило, сезон, время суток, широта и солнечная активность.

На рис.1 в качестве иллюстрации приведены типичные широтные вариации величины N_e в максимуме слоя F ионосферы в полдень (левая половина рисунка) и в полночь (правая половина) равноденственного сезона для

различных уровней солнечной активности (кривые 1-3 соответствуют числам Вольфа $R \sim 10, 100$ и 200) [3]. Точками и крестиками обозначены усредненные данные ионосферных станций, расположенных примерно вдоль одного магнитного меридиана. Квадратики – данные ракетных измерений. Кружки – значения, взятые из различных модельных профилей. По оси абсцисс отложена геомагнитная широта Φ .

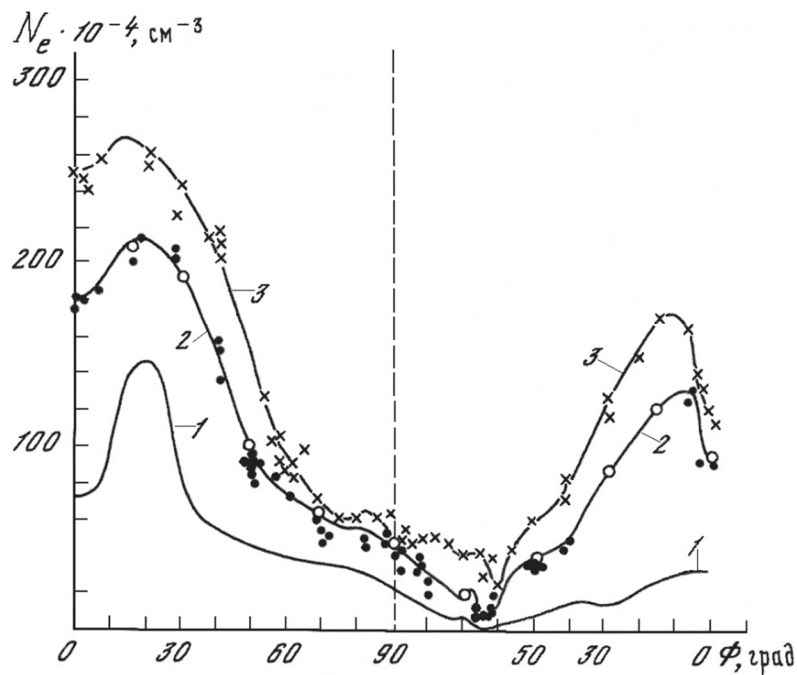


Рис.1. Типичные изменения величины N_e в максимуме слоя F ионосферы в районе широтной аномалии (по данным [3])

В первом приближении можно считать, что на низких широтах кривая $N_e(\Phi)$ симметрична относительно геомагнитного экватора (ось ординат $\Phi = 0$) и имеет 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 и выбираются из модельных профилей [3], соответствующих условиям проведения расчетов. Для аппроксимации подобной кривой 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: $\Phi_0 \sim 20^\circ$; $N_m(\Phi_0) \sim 1,5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$; $N_m(0) \sim 7,0 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$. Эти параметры будут использованы ниже для проведения расчетов.

Основное отличие приполярной и низкоширотной возмущенной нижней ионосферы заключается в различии физической природы естественных возмущений. Если в приполярной ионосфере таким источником является повышенная геомагнитная активность, то в низкоширотной ионосфере основную роль играют мощные электромагнитные импульсы (ЭМИ) молниевых разрядов [4,5]. Нижняя приэкваториальная ионосфера постоянно «пропускает» через себя десятки ГигаВатт электромагнитной энергии в относительно узком интервале низких частот [5].

При проведении спутниковых измерений на низких широтах необходимо учесть, что чем ближе точка старта к геомагнитному экватору, тем ближе к земле силовая линия пересекает экваториальную плоскость. Пусть силовая линия проходит через область демодуляции на высоте h и широте Φ . Вследствие анизотропии среды НЧ излучение формирует пучок, расположенный в окрестности стартовой силовой линии. Используя дипольную модель геомагнитного поля [6], легко найти максимальную высоту h_m , на которой эта силовая линия пересекает экватор:

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

где $R_0 \approx 6370$ км – радиус Земли. 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 заниженной. Тем не менее, ясно, что для успешной бортовой регистрации демодулированных в нижней ионосфере на низких широтах НЧ волн необходимо иметь ИСЗ с экстремально низкой орбитой, либо использовать измерительные ракеты, регистрирующие не горизонтальное [1], а вертикальное распределение параметров НЧ поля.

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. Как и в работе [1], будем считать, что на «регулярный» профиль $N_e(h)$ аддитивно накладывается возмущенный профиль нижней ионосферы $N_c(\vec{r})$, в котором и происходит интенсивное поглощение мощного КВ-излучения [1]:

$$N_c(r_c) = N_{c0} \exp(-r_c^2 / 2\Delta r^2), \quad (4)$$

где r_c – расстояние от центра возмущения. 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.

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 . Из-за анизотропии среды лучи наклоняются к югу противоположно вектору \vec{B}_0 , собираясь в относительно узкий пучок.

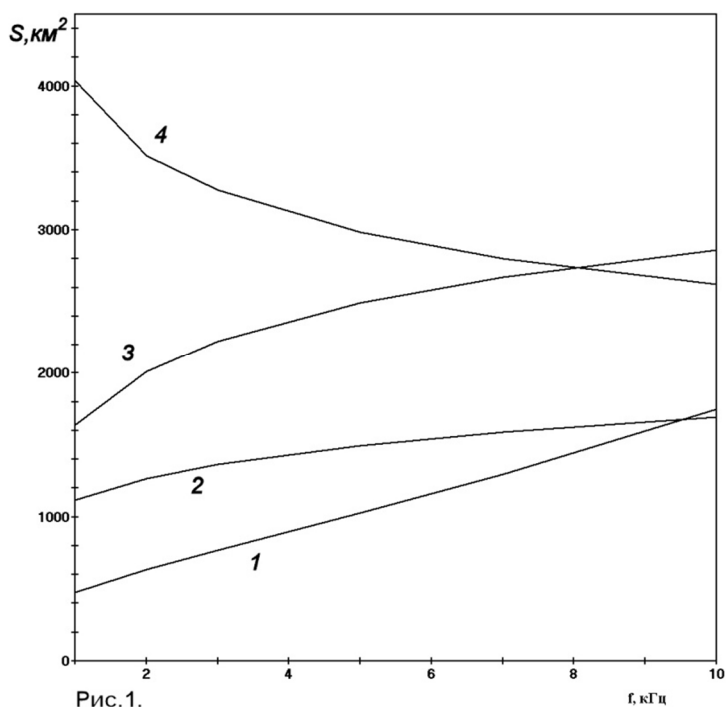


Рис. 1.

На рис.1 приведена зависимость площади S сечения пучка лучей геомагнитной экваториальной плоскостью от частоты для стартовых широт 10, 15, 20 и 25° (соответственно кривые 1-4). Из рисунка можно получить грубую оценку среднего радиуса «пятна» ~50 км, что для измерений с борта горизонтально летящего аппарата составляет чрезвычайно малую величину.

На рис.2 приведены зависимости от высоты на экваторе относительной амплитуды A НЧ поля для различных частот и стартовых широт пучка. Группы кривых (1,2), (3,4), (5-7) и (8-10) соответствуют стартовым широтам 10, 15, 20 и 25°. Кривые 1,3,5,8 соответствуют частоте 1 кГц; кривые 6 и 9 – 5 кГц; кривые 2,4,7,10 – частоте 10 кГц (для начальных широт 10 и 15° данные для частоты 5 кГц опущены для лучшей видимости оставшихся кривых). Величина A вычислялась как отношение амплитуды электрического поля волны в плазме к амплитуде электрического поля того же источника в вакууме. Из рисунка видно, что распределение поля имеет вид чрезвычайно узких пиков, соответствующих каустическим границам пучка. Чем больше частота волны и стартовая широта, тем более сформирован пучок. Слева на кривых 8-10 отчетливо видно формирование интерференционного максимума с ростом частоты.

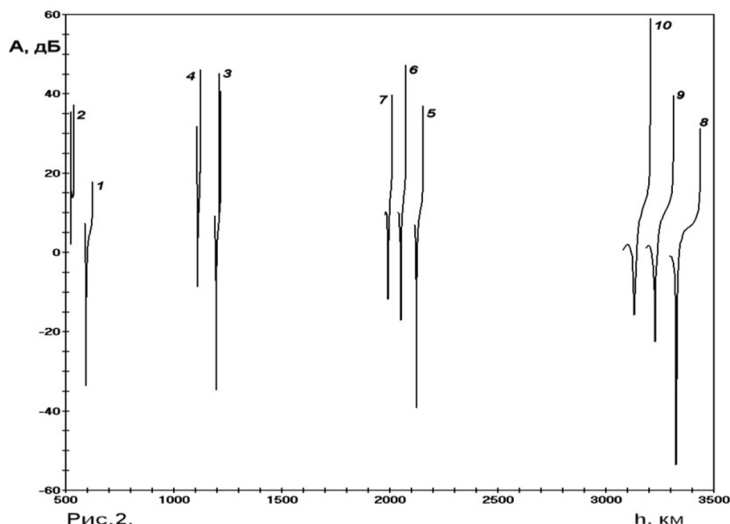


Рис. 2.

Величина A вычислялась как отношение амплитуды электрического поля волны в плазме к амплитуде электрического поля того же источника в вакууме. Из рисунка видно, что распределение поля имеет вид чрезвычайно узких пиков, соответствующих каустическим границам пучка. Чем больше частота волны и стартовая широта, тем более сформирован пучок. Слева на кривых 8-10 отчетливо видно формирование интерференционного максимума с ростом частоты.

Из результатов проведенных расчетов характеристик распространения демодулированного НЧ пучка на низких широтах в присутствии широтных градиентов экваториальной аномалии следует, что пучок имеет чрезвычайно малые пространственные размеры. Амплитуда электромагнитного поля в таком пучке распределена крайне неравномерно, что обусловлено интерференционными эффектами при конкурирующем воздействии градиентов плотности плазмы и ее анизотропии в присутствии неоднородного геомагнитного поля.

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. Фаткуллин М.Н., Зеленова Т.И., Козлов В.К., Легенька А.Д., Соболева Т.Н. Эмпирические модели среднеширотной ионосферы. – М.: Наука. – 1981. - 256 с.
4. Inan U.S., Bell T.F., Rodriguez J.V. // Geophys. Res. Lett., – 1991, v.18, № 4, p.705.
5. Blaes P.R. Remote sensing and statistical analysis of the lightning-ionosphere interaction. . Ph.D. Thesis, Stanford Univ. California, – 2015. http://vlf.stanford.edu/sites/default/files/publications/blaes_thesis.pdf
6. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. – М.: Мир.1973. – 504 с.