

УДК 621.371.25

Прохождение сверхдлинных радиоволн при активных воздействиях на ионосферу

Н.Д. Наумов

Получены оценки коэффициента прохождения через ионосферу сверхдлинных радиоволн от наземного передатчика при выбросе плазмогасящих веществ и от воздействия ионосферного источника, создаваемого нагревным стендом.

PACS: 94.20.ws

Ключевые слова: магнитоактивная плазма, электромагнитная волна, коэффициент прохождения.

Введение

Интерес к задаче о прохождении сверхдлинных радиоволн через ионосферу обусловлен проводимыми в настоящее время исследованиями по инъекции ОНЧ-излучения в магнитосферу с помощью нагрева ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением [1], а также по использованию наземных СДВ передатчиков для контролируемого высыпания электронов из радиационных поясов Земли [2]. Создаваемый с помощью нагревного стенда низкочастотный источник находится в нижней ионосфере, поэтому существующих данных о коэффициенте прохождения сверхдлинных радиоволн [3] недостаточно, т.к. они относятся к прохождению через всю ионосферу. Необходимость в получении новых данных возникает также и для наземных передатчиков, если с целью уменьшения поглощения сверхдлинных радиоволн производится выброс в ионосферу плазмогасящих веществ.

В данной работе для проведения оценок коэффициента прохождения сверхдлинных радиоволн применительно к указанным выше задачам используется плоскостойкая модель ионосферы, в которой радиоволна распространяется вдоль магнитного поля Земли. Как известно, основное поглощение сверхдлинных радиоволн происходит в слое D ионосферы. Поэтому заранее очевидно, что коэффициент прохождения этих радиоволн увеличится в случае уменьшения концентрации электронов при выбросе в этом слое плазмогасящих веществ или при расположении источника

Наумов Николай Дмитриевич, вед. научн. сотрудник
ФГКУ «12 ЦНИИ Минобороны России».
Россия, 141307, Московская обл., г. Сергиев Посад-7.
E-mail: ndnaumov@mail.ru

излучения за этим слоем ионосферы. Вопрос заключается в получении количественной оценки этого увеличения, что и являлось целью данной работы.

Расчетная модель

Как следует из теории распространения электромагнитных волн в магнитоактивной плазме [4], если частота необыкновенной волны, распространяющейся вдоль магнитного поля, меньше циклотронной частоты электрона, то такая волна может проходить через плазму, даже если ее частота меньше плазменной частоты, чего нельзя сказать об обыкновенной волне. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать необыкновенную волну СДВ-диапазона.

В нижней ионосфере велики градиенты электронной концентрации, поэтому здесь приближение геометрической оптики оказывается неприменимым и нужно исходить из прямого решения уравнений Максвелла.

Рассмотрим слой плазмы, характеристики которой зависят от координаты z , в однородном магнитном поле $\mathbf{B}_0 = B_0 \mathbf{e}_z$. Тогда электрическое поле необыкновенной волны, распространяющейся вдоль магнитного поля, удовлетворяет следующему уравнению:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 F}{dz^2} + \kappa^2 F &= 0, \\ F &= E_x + iE_y, \\ \kappa^2 &= \frac{\omega^2}{2} \left(1 + \frac{v}{\sqrt{u} - 1 + is} \right), \\ u &= \frac{\omega_0^2}{\omega^2}, \quad v = \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \quad s = \frac{v_{eff}}{\omega}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь ω_0 — гиромангнитная частота электрона, ω_p — плазменная частота, ω — круговая частота волны, v_{eff} — эффективная частота столкновений

Статья поступила в редакцию 10 апреля 2014 г.

© Наумов Н.Д., 2014

электронов. Для сверхдлинных радиоволн влиянием ионов на диэлектрическую проницаемость ионосферной плазмы можно пренебречь.

Коэффициент прохождения определяется как отношение среднего по времени значения потока энергии в прошедшей волне к аналогичному значению в падающей волне. Будем считать, что плоскость $z = z_1$ соответствует падающей волне, а после плоскости $z = z_2 > z_1$ применимо приближение геометрической оптики; в частности, для дневной ионосферы можно взять $z_2 = 200$ км. Тогда значение коэффициента прохождения на высоте $z > z_2$ можно представить в виде произведения двух сомножителей [5]:

$$D(z) = D_1 D_2(z).$$

Здесь D_1 — коэффициент прохождения от плоскости $z = z_1$ до плоскости $z = z_2$, D_2 — коэффициент прохождения от плоскости $z = z_2$ до высоты z . Таким образом, D_2 определяется известным выражением для коэффициента прохождения в приближении геометрической оптики.

Выражение для коэффициента D_1 имеет вид:

$$D_1 = \frac{4 \operatorname{Re}(iF_2^* F_2')}{k_1 |F_1 + \frac{i}{\kappa_1} F_1'|^2}, \quad (2)$$

где $k_1 = k(z_1)$, $\kappa_1 = \operatorname{Re}(k_1)$, F_1 , F_1' — значения решения уравнения (1) и его производной в точке $z = z_1$, F_2 , F_2' — аналогичные величины при $z = z_2$, которые являются граничными условиями для уравнения (1). Эти граничные условия должны соответствовать существованию после плоскости $z = z_2$ только прошедшей волны. Из структуры выражения (2) видно, что при решении уравнения (1) значение F_2 может быть задано произвольно, т.к. это не влияет на величину D_1 , поскольку дифференциальное уравнение (1) линейно, а величина F_2' пропорциональна значению F_2 .

Результаты расчетов

На основе обработки результатов измерений напряженности магнитного поля низкочастотного излучения, возникающего при нагреве ионосферы стендом HAARP, было установлено, что источник этого излучения можно рассматривать как горизонтальный магнитный диполь, расположенный на высоте ~ 90 км [6]. В связи с этим были проведены расчеты значений коэффициента прохождения на высоте $z_2 = 200$ км для радиоволны с высоты $z_1 = 90$ км, результаты которых представлены на рис. 1. Для удобства на этом рисунке приведены также результаты расчета коэффициента прохождения для волны с нижней границы ионосферы. Численное решение дифференциального уравнения (1) проводи-

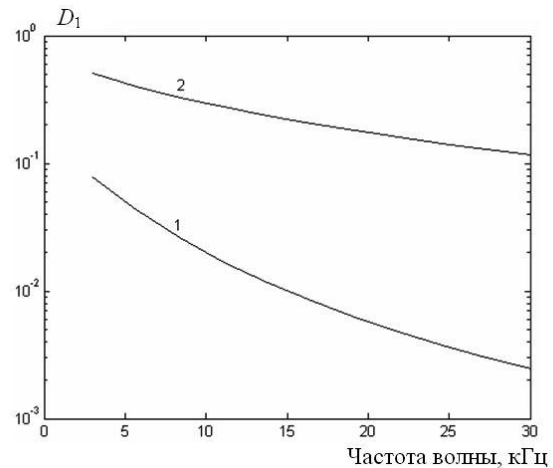


Рис. 1. Зависимость коэффициента прохождения от частоты радиоволны: 1 — волна с высоты 60 км, 2 — волна с высоты 90 км

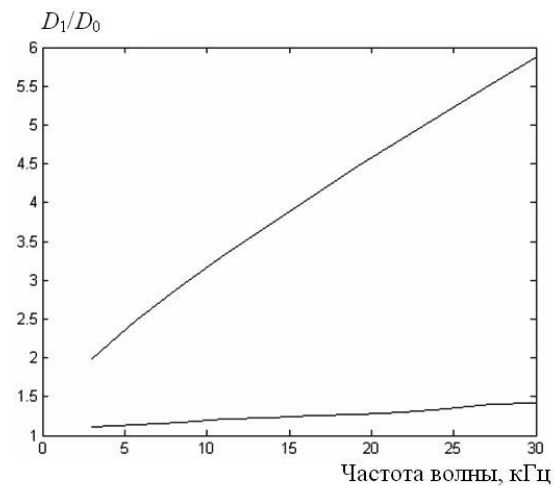


Рис. 2. Относительное увеличение коэффициента прохождения при выбросе плазмогасящих веществ: для верхней кривой $z_s = 60$ км, для нижней кривой $z_s = 100$ км;

лось с помощью стандартных решателей пакета MatLab 6.5. При проведении расчетов использовались характеристики дневной ионосферы из работ [7, 8].

Выброс в ионосферу плазмогасящих веществ приводит к образованию крупномасштабных областей с пониженной электронной концентрацией. Как показали результаты измерений в рамках экспериментов по проекту VIME, концентрация электронов уменьшается, примерно, на 50% от начальной величины в области с диаметром ~ 100 км [9].

Были проведены расчеты изменения коэффициента прохождения D_1 при уменьшении вдвое концентрации электронов в слое ионосферы толщиной 100 км для двух случаев расположения нижней границы этого слоя z_s . Результаты расчетов представлены на рис. 2, где для верхней кривой $z_s = 60$ км, для нижней кривой $z_s = 100$ км; D_0 соответствует кривой 1 на рис. 1.

Заключение

Полученные результаты могут быть использованы для оценки интенсивности ОНЧ-излучения, проникающего в магнитосферу от ионосферного источника, создаваемого нагревным стендом, или от наземного передатчика при модификации ионосферной плазмы. Эти данные существенны для анализа влияния новых источников ОНЧ-излучения на высыпание электронов из радиационного пояса Земли вследствие изменения питч-угла после резонансного взаимодействия частицы с электромагнитной волной [10].

Литература

1. *Golkowski M., Inan U.S., Cohen M.B., Gibby A.R.* // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. No. A00F04, doi:10.1029/2009JA014610.
2. *Marshall R.A., Newsome R.T., Lehtinen N.G., et al.* // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. No. A08206, doi:10.1029/2010JA015394.

3. *Аксенов В.И.* // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1975. Т. 18. № 9. С. 1333.
4. *Гинзбург В.Л., Рухадзе А.А.* *Волны в магнитоактивной плазме.* — М., Наука, 1975.
5. *Аксенов В.И.* // *Радиотехника и электроника.* 1966. Т. 11. № 6. С. 1030.
6. *Kosch M.J., Pedersen T., Bortnik J., et al.* Report of Air Force Research Laboratory AFRL-VS-HATR-2004-1038, 2004.
7. *Гуревич А.В., Фищук Д.И., Цедилина Е.Е.* // *Геомагнетизм и аэрномия.* 1973. Т. 13. № 6. С. 31.
8. *Гайворонская Т.В., Соболева Т.Н., Тушенцова И.А., Цедилина Е.Е.* // *Геомагнетизм и аэрномия.* 1974. Т. 14. № 6. С. 25.
9. *Благовещенская Н.Ф.* *Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве.* — СПб.: Гидрометеоздат, 2001.
10. *Наумов Н.Д.* // *Успехи прикладной физики.* 2013. Т. 1. № 1. С. 19.

Passage of VLF radio waves under active influence on the ionosphere

N. D. Naumov

12-th Central Research Institute
Sergiev Posad-7, Moscow Region, 141300, Russia
E-mail: ndnaumov@mail.ru

The transmission coefficient of VLF radio waves from ground based transmitters and from ionospheric source caused by heating facility is evaluated.

PACS: 94.20.ws

Keywords: magnetized plasma, electromagnetic wave, transmission coefficient.

References

1. *M. J. Golkowski, U. S. Inan, M. B. Cohen, et al., J. Geophys. Res.* **115**, No. A00F04 (2010), doi:10.1029/2009JA014610.
2. *R. A. Marshall, R. T. Newsome, N. G. Lehtinen, et al., J. Geophys. Res.* **115**, No. A08206 (2010), doi:10.1029/2010JA015394.
3. *V. I. Aksenov, Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Radiofizika*, **18**, 1333 (1975).
4. *V. L. Ginzburg and A. A. Rukhadze, Waves in Magnetoactive Plasmas* (Nauka, Moscow, 1975) [in Russian].
5. *V. I. Aksenov, J. Commun. Technol. Electron.* **11**, 1030 (1966).
6. *M. J. Kosch, T. Pedersen, J. Bortnik, et al.* Report of Air Force Research Laboratory AFRL-VS-HATR-2004-1038, 2004.
7. *A. V. Gurevich, D. I. Fishchuk, and E. E. Tsedilina, Geomagnetism and Aeronomy* **13** (6), 31 (1973).
8. *T. V. Gaivoronskaya, T. N. Sobleva, I. A. Tushentsova, et al., Geomagnetism and Aeronomy* **14** (6), 25 (1974).
9. *N. F. Blagoveshchenskaya, Geophysic Effects of Active Influence in the Circumterrestrial Space* (Gidrometeoizdat, SPb, 2001) [in Russian].
10. *N. D. Naumov, Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 19 (2013).