

Распространение КВ-радиоволн в полярной ионосфере в периоды усиления магнитосферной конвекции

Г.А. Власков, А.М. Можяев, В.И. Снежков

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону

Аннотация: В рамках простых объемных моделей электронной концентрации в F-слое полярной ионосферы рассмотрено влияние нестационарной конвекции на состояние радиотрасс в высоких широтах. Модельные расчеты коротковолновых радиолучей показали существенное различие для спокойных и возмущенных условий в приполярной ионосфере.

Ключевые слова: ионосфера, рефракция, конвекция, плазма, радиолучи, высокие широты.

Рефракция коротковолновых радиоволн, распространяющихся в ионосфере средних широт, в основном определяется вертикальными градиентами электронной плотности среды. В высоких широтах заметную роль играют и горизонтальные градиенты электронной плотности. Известно [1], что возникновение крупномасштабных электрических полей магнитосферной конвекции влечет за собой глобальное перераспределение электронной плотности. Также отмечалось [2], что это заметно влияет и на состояние высокоширотных радиотрасс. Рассмотрим простой способ расчёта радиолучей в геометрическом приближении. Уравнение радиолучей представим в виде [3]:

$$d\vec{r}/dt = \vec{v}; \quad d\vec{r}/ds = \nabla\gamma - \vec{t}(\vec{t}\nabla\gamma) \quad (1)$$

где s – натуральный параметр; $\gamma = (1/2)\ln \varepsilon$; \vec{r} – радиус вектор траектории луча; \vec{t} – касательный единичный вектор.

Используем разложение вектора по ортам репера Френе [6]:

$$\nabla\gamma = \vec{t}(\vec{t}\nabla\gamma) + \vec{\theta}(\vec{\theta}\nabla\gamma) + \vec{\beta}(\vec{\beta}\nabla\gamma) \quad (2)$$

где \vec{t} , $\vec{\theta}$, $\vec{\beta}$ – единичные векторы касательной, нормали, бинормали репера.

После подстановки выражения (2) в формулу (1) получим

$$d\vec{r}/ds = \vec{\theta}(\vec{\theta}\nabla\gamma) + \vec{\beta}(\vec{\beta}\nabla\gamma) \quad (3)$$

Учет соотношения Френе позволяет записать кривизну k луча:

$$\vec{e}_r \nabla \gamma = k; \quad (4)$$

Дифференцируем $\vec{e}_r \nabla \gamma = 0$: $(d\vec{e}_r/ds) \nabla \gamma + \vec{e}_r (d\nabla \gamma/ds) = 0$, но $d\vec{e}_r/ds = \kappa \vec{e}_\theta$, κ – кручение, тогда

$$\kappa (\vec{e}_\theta \nabla \gamma) = \vec{e}_r \nabla (d\gamma/ds) = - \vec{e}_\theta \nabla (\vec{e}_r \nabla \gamma) / k \quad (5)$$

Уравнения (3), (4) дают возможность вычислить кривизну k и кручение κ радиолуча, если известен логарифмический коэффициент преломления $\gamma = \gamma(\vec{r})$. Значение функции γ могут быть получены из модельных распределений электронной концентрации. Известно [4], что кривая однозначно определяется кривизной и кручением вплоть до ее положения в пространстве.

Разложение радиус – вектора точек радиолуча в ряд Тейлора с учетом формул Френе позволяет построить алгоритм интегрирования траектории радиолучей в ионосфере:

$$d\vec{r} = \vec{e}_r (ds - k^2 ds^3/6) + \vec{e}_\theta k ds^2/2 + (dk/ds) ds^3/6 + \vec{e}_\phi (k\kappa ds^3/6) \quad (6)$$

Формула (6) совместно с (4) и (5) дает возможность рассчитать следующую точку радиолуча при известной предыдущей.

Для тестовой апробации предложенного алгоритма была рассмотрена задача, допускающая аналитическое решение. Расхождение в точке прихода радиолуча между точным и численным решением при шаге Δs вдоль траектории, равным 5 км, и длине трассы порядка 1000 км, меньше 10 км.

На рисунках 1а, 1б, 2а, 2б представлены траектории радиолучей, рассчитанные для объемной модели F – области полярной ионосферы [7]. Параметры модели отвечают следующим условиям: число солнечных пятен $R = 200$, время 18 UT, 6 марта. Географические координаты передатчиков $\vartheta = 70^\circ$, $\lambda = 0^\circ$. Радиолучи частот 2.5, 5, 7.5 МГц выходят в направлении на северный географический полюс под углом 27° . Таким образом, радиотрасса

проходит в вечернем секторе полярной ионосферы и пересекает характерные для этой зоны крупномасштабные неоднородности.

Рассматривался сценарий возмущения конвекции, предложенный в [3]. Рис.1а, 1б соответствуют спокойным условиям.

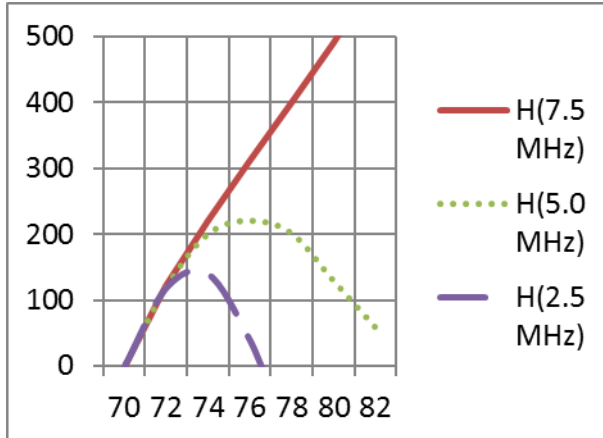


Рис. 1а.

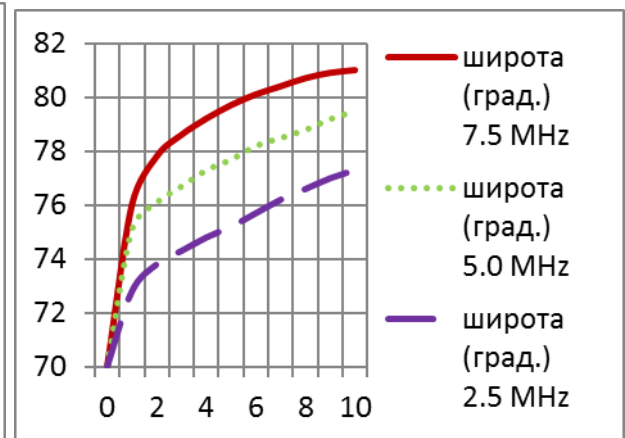


Рис.1б.

Рис. 1. Траектории лучей соответствующие спокойным условиям

Радиолучи, проникая на значительные высоты (рис.1а.), испытывают заметное боковое отклонение в антисолнечном направлении (рис.1б). Это определяется в первую очередь тем, что радиотрасса проходит в непосредственной близости от терминатора, где наблюдаются существенные горизонтальные градиенты Ne [8]. Структуры конвективного происхождения при этом слабо выражены.

Те же самые параметры ионосферы и время соответствуют рис. 2а и рис.2б. Однако в расчетах здесь предполагалось, что во время 16 UT началось возмущение конвекции и развивалось предложенному в [3] сценарию. Заметно изменились условия прохождения радиолучей. Незначительным стало боковое отклонение, ниже высота отражения от ионосферы и, соответственно, более короткими скачки радиотрассы.

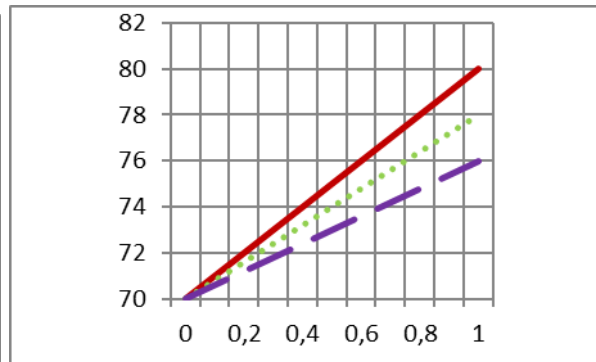
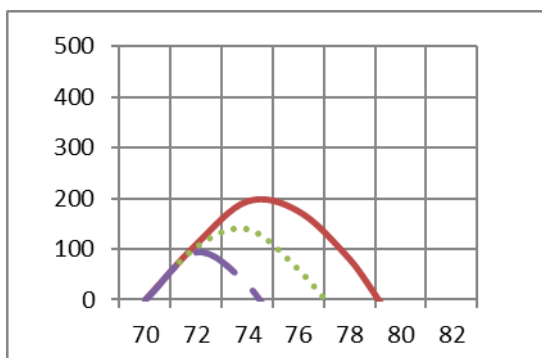


Рис. 2а: __ Н(7.5) МHz;

Рис.2б __ широта (рад.) (7.5) МHz

.... Н(5.0) МHz; __ __ Н(2.5 МHz);

..... широта (рад.) (5.0) МHz

Рис.2. Траектории лучей при возмущении конвекции

Это определяется тем, что усилившаяся конвекция принесла в полярную шапку дополнительную ионизацию с дневной стороны, и вдвое увеличилась величина электронной концентрации на этом участке [9]. Полученные результаты для спокойных условий в основном согласуются с выводами работы [1]. При этом необходимо учитывать нестационарное состояние магнитосферной конвекции и соответствующие изменения ионосферы [10].

Литература

1. Мингалёв В.С., Орлова М.И., Мингалёва Г.И., Буянова Т.В. Моделирование прохождения КВ-сигналов на высокоширотной трассе в условиях равноденствия // Геомагнетизм и аэрономия, 1990. № 5. с. 871-875.
2. Власков Г.А., Можаяев А.М., Пономарёв Ю.Н., Исаев Н.В. Вариации крупномасштабной структуры F-области высокоширотной ионосферы, обусловленные типовыми изменениями магнитосферной конвекции. М: ИЗМИРАН. Препринт, 1991г. 43(990). 20 с.
3. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 178 с.

4. Стернберг С. Лекции по дифференциальной геометрии. М.: Мир, 1970. 126 с.
5. Бурцев А.Г., Мельников А.В. Численное моделирование и анализ спектра системы прерывающихся сигналов //Инженерный вестник Дона, 2014, - № 2, URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2017/2064/2314.
6. Яковлев О. И., Якубов В. П., Урядов В.П., Павельев А. Г. Распространение радиоволн. С.-П: ЛЕНАНД, 2009. 496 с.
7. Благовещенский Д. В., Борисова Т. Д., Калишин А. С. Нестандартные (боковые) моды распространения на высокоширотной коротковолновой радиотрассе // Известия вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52. № 4. С. 101 – 112.
8. Яковлев В.В. Арсеньев Д.М. Исследование точности спутниковых определений по мере удаления от базовой станции //Инженерный вестник Дона, 2017, № 1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2017/4061.
9. Namgaladze A.A., Zubova Yu.V., Namgaladze A.N. Modelling of the ionosphere/thermosphere behaviour during the April 2002 magnetic storms: A comparison of the UAM results with the ISR and NRLMSISE-00 data // Advances in Space Research.2005. doi:10.1016/j.asr.2005. 04.013.
10. Кораблева И.В., Намгаладзе А.А., Намгаладзе А.Н. Высокоширотная ионосфера в период магнитных бурь 26 октября – 01 ноября 2003 г.: томографические реконструкции и численное моделирование // Геомагнетизм и Аэрномия. 2008. Т.48, №5. с. 671-680.

References

1. Mingalev V.S., Orlova M.I., Mingaleva G.I., Bujanova T.V. Geomagnetizm i aeronomija 1990. № 5. pp. 871-875.
2. Vlaskov G.A., Mozhaev A.M., Ponamarev U.N, Isaev N.V. Variatsii krupnomasshtabnoy struktury F-oblasti vysokoshirotnoy ionosfery, obuslovlennyye tipovymi izmeneniyami magnitosfernoy konveksii [Variations in the large-scale structure of the f-region of the high-latitude ionosphere due to typical

- magnetospheric convection changes]. М: IZMIRAN. Preprint, 1991г. 43(990). 20 p.
3. Tatarskii V.I. Rasprostranenie voln v turbulentnoi atmosphere [Wave propagation in turbulent atmosphere]. М.: Nauka, 1967. 178 p.
 4. Sternberg S. Lektsii po differentsialnoi geometrii [Lectures on differential geometry]. М.:Mir. 1970. 126 p.
 5. Burtsev A.G., Melnikov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, № 2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2017/2064/2314.
 6. Yakovlev O.I., Yakubov V.P., Urjadov V.P., Pavelev A.G. Rasprostranenie radiovoln [Propagation of radio waves]. S.-P.: LENAND, 2009. 496 p.
 7. Blagovechenskii D.V., Borisova T.D., Ralinin A.S. Izvestija vuzov. Radiophysika. 2009. v. 52. № 4. Pp. 101 – 112.
 8. Yakovlev V.V., Arsenev D.M. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2017/4061.
 9. Namgaladze A.A., Zubova Yu.V., Namgaladze A.N. Advances in Space Research. 2005. doi:10.1016/j.asr.2005. 04.013.
 10. Korableva I.V., Namgaladze A.A., Namgaladze A.N. Geomagnetizm i aeronomija 2008. V.48, №5. Pp. 671-680.