

## Особенности лучевой структуры электромагнитных полей в реальной ионосфере

Кирьянова К.С. , Крюковский А.С.

аспирантка, НОУ ВПО «Российский новый университет»

kiryanova-ks@yandex.ru

д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой «Информационные технологии и естественно-научные дисциплины», НОУ ВПО «Российский новый университет»

kryukovsky@rambler.ru

*Изучено распространение радиоволн в ионосферной плазме на основе применения бихарактеристической системы уравнений. Выполнено численное моделирование распространения радиоволн в изотропной плазме. Получены лучевые структуры при различном положении источника излучения. По данным радиотомографии исследовано влияние периодической структуры максимума слоя в экваториальной зоне на распространение декаметровых радиоволн.*

*The propagation of radio waves in the ionospheric plasma on the basis of the bicharacteristic system of equations was studied. Numerical modeling of the radiowaves in an isotropic plasma was performed. The ray structures at different positions of the radiation source are obtained. According radiotomography the influence of periodic structure of a maximum of a layer in an equatorial zone in the propagation of decameter radio waves was investigated.*

### Введение

Коротковолновый диапазон позволяет организовать связь на дальние расстояния, что достигается благодаря отражению радиоволн от ионосферы. Однако появление различных неоднородностей в среде распространения сигнала приводит к ухудшению радиосвязи или к её отсутствию. Таким образом, для обеспечения работы систем навигации, радиолокации и связи необходимо не только изучать структуру среды распространения радиоволн, но и выбирать наиболее эффективные вычислительные алгоритмы и схемы расчета характеристик распространения радиосигналов. При исследовании процессов распространения коротких волн в различных средах традиционными являются лучевые методы. Одним из таких методов является метод бихарактеристик, развитый в работах Д.С. Лукина в 60-х годах прошлого века [1,2]. Этот метод, основанный на численном решении системы обыкновенных дифференциальных уравнений, позволяет получить лучевую структуру волновых полей, не прибегая к громоздким вычислениям.

### 1. Метод бихарактеристик

При построении траектории луча, гамильтонова бихарактеристическая система уравнений в неоднородной среде может быть записана в следующем виде [1,2]:

$$\frac{d\vec{k}}{dt} = \frac{\partial \omega^2 \varepsilon}{\partial \vec{r}} \left( \frac{\partial \omega^2 \varepsilon}{\partial \omega} \right)^{-1}, \quad \frac{d\vec{r}}{dt} = \left( 2c^2 \vec{k} - \frac{\partial \omega^2 \varepsilon}{\partial \vec{k}} \right) \left( \frac{\partial \omega^2 \varepsilon}{\partial \omega} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где  $\vec{r} = (x, y, z)$  – координаты точки наблюдения,  $\vec{k} = (k_x, k_y, k_z)$  – волновой вектор,  $\omega$  – круговая рабочая частота излучения,  $c$  – скорость света,  $t$  – параметр вдоль лучевой траектории,  $\varepsilon \equiv \varepsilon(\vec{r}, \vec{k}, \omega)$  – эффективная диэлектрическая проницаемость среды распространения.

Рассматривается модель неоднородной изотропной ионосферы:

$$\varepsilon = 1 - \nu. \quad (2)$$

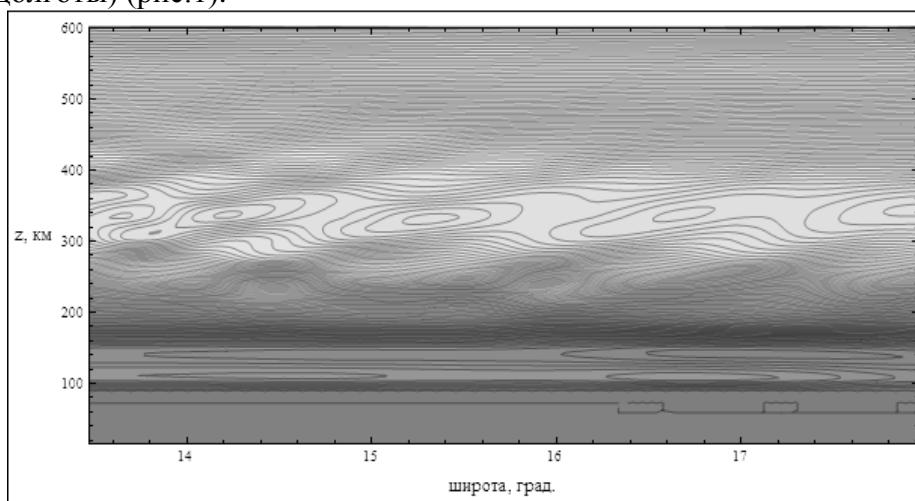
В формуле (2) введено обозначение:

$$\nu = \frac{\omega_p^2}{\omega^2} = \frac{4\pi e^2 N}{m_e \omega^2}, \quad (3)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $m_e$  – масса электрона,  $N$  – профиль электронной концентрации.

При решении бихарактеристической системы вычислялись координаты луча  $\vec{r}(t)$  и волновой вектор  $\vec{k}(t)$  как функции параметра  $t$ . Для вычисления бихарактеристик в ионосферной плазме применялись пакеты прикладных программ, поддерживающие символьные вычисления.

Рассматриваются результаты моделирования лучевых структур в случае, когда профили электронной концентрации представлены в виде интерполяционных функций по данным, полученным в [3-6] методом радиотомографии. Для этого выполнена реконструкция E и F областей в экваториальной зоне вдоль меридиана  $\sim 121^\circ\text{E}$  (восточной долготы) (рис.1).



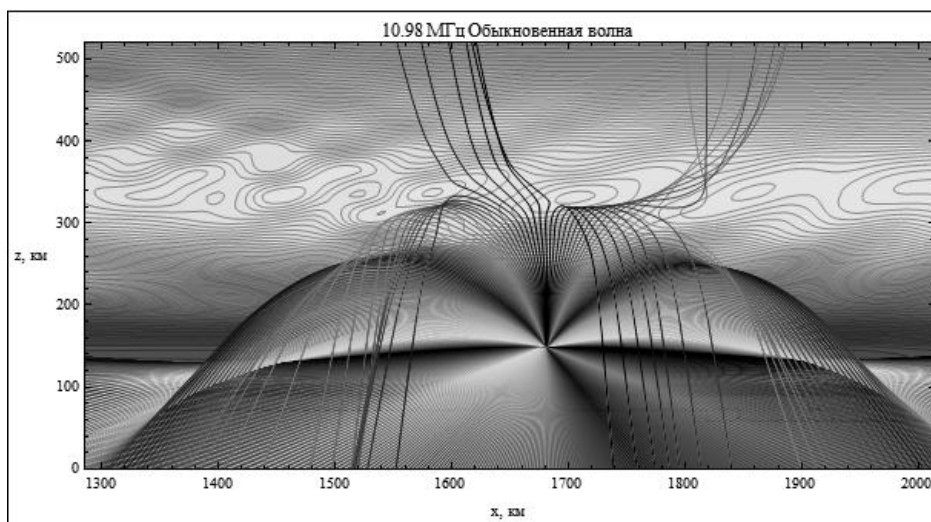
**Рис. 1. Электронная концентрация по данным радиотомографии**

На рис.1 более светлые области соответствуют более высокому уровню концентрации электронов, а темные – более низкому. Максимальное значение электронной концентрации в максимуме слоя F составляет 1 млн. 714 тыс. электронов в кубическом сантиметре. Хорошо видна квазипериодическая структура в окрестности максимума слоя F.

## 2. Лучевые траектории

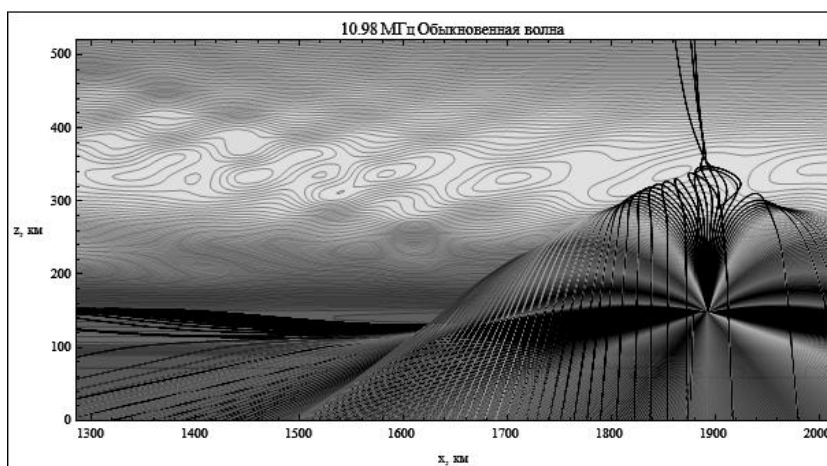
Рассматривается лучевая структура изотропного источника, излучающего на частоте 10.98 МГц (рис.2). Источник излучения находится на высоте 150 км и на широте  $15^\circ$ . Наблюдается очень интересная лучевая структура. Вследствие того, что источник находится непосредственно под максимумом электронной концентрации, часть лучей отражается на высоте 320 км и возвращается на Землю. При этом образуется сложная каустическая структура. Часть лучей просачивается в ионосферу слева и справа от максимума слоя. Это объясняется наличием областей пониженной электронной концентрации, которые находятся на уровне максимума слоя. Электронная концентрация в таких провалах слишком низка, чтобы отразить волну. Таким образом, обеспечивается свободное прохождение того пучка лучей, который

попадает в такую ионосферную область. Видно, что отражение лучей происходит не только на высоте максимума слоя, но и ниже – на высоте 250 км. Эти лучи возвращаются на Землю, обеспечивая хороший уровень радиосвязи. Уменьшение рабочей частоты источника излучения обеспечит возврат всех лучей на Землю. При этом высота отражения лучей будет уменьшаться. При увеличении же рабочей частоты радиосигнал будет уходить вверх в ионосферу.



**Рис. 2. Лучевая структура. Рабочая частота 10.98 МГц, высота 150 км, широта 15°.**

При смещении источника излучения правее, до широты 17°, лучевая структура сильно меняется, что хорошо видно на рис.3. Лучи попадают в очередной ионосферный провал, но уже не все просачиваются выше. В ионосферу уходит лишь малая часть, остальные закручиваются, отражаются от максимума электронной концентрации и возвращаются на Землю. При движении источника излучения вверх, уже на высоте около 200 км, большее количество лучей попадают в область пониженной электронной концентрации (провал) и уходят в ионосферу. Основная часть лучей отражается от ионосферы и, образуя купол, возвращается на Землю, что значительно уменьшает область приёма радиосигнала. Чем выше поднимается источник, тем значительно уменьшается область, где будет устойчивая радиосвязь.



**Рис. 3. Лучевая структура. Рабочая частота 10.98 МГц, высота 150 км, широта 17°.**

Такая ситуация отражена на рис.4. Источник излучения расположен на высоте 240 км. Сравнивая с рис.3, видно, насколько сильно уменьшилась на Земле область приема сигнала.

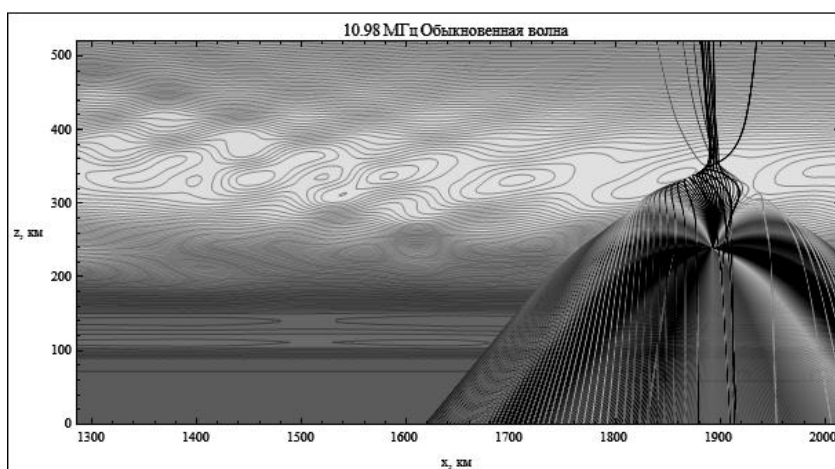


Рис. 4. Лучевая структура. Рабочая частота 10.98 МГц, высота 240 км, широта 17°.

Совсем иная ситуация наблюдается при размещении источника излучения выше максимума слоя, т.е. выше 350 км. Это хорошо демонстрирует рис.5. Здесь высота размещения источника излучения составляет 400 км, широта 16°. Большая часть лучей, отражаясь от областей высокой электронной концентрации, уходит в верхнюю ионосферу. На Землю приходит только та часть лучей, которая попадает в область низкой электронной концентрации.

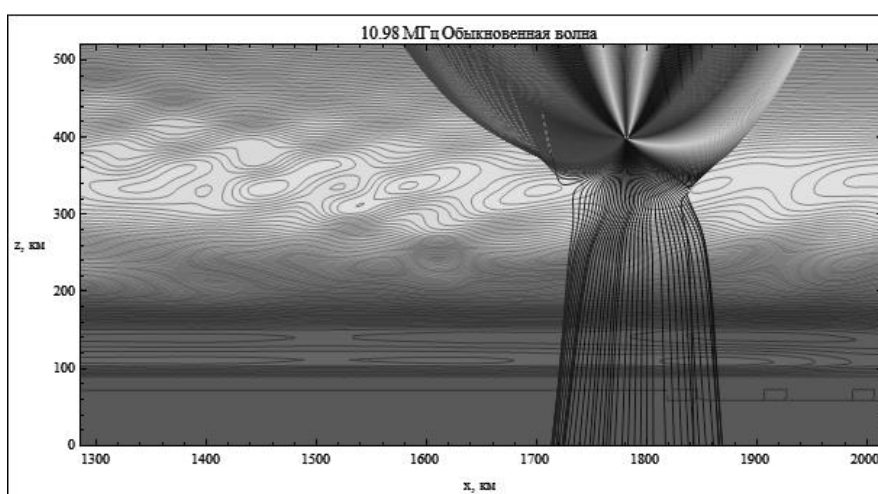


Рис. 5. Лучевая структура. Рабочая частота 10.98 МГц, высота 400 км, широта 16°.

### Заключение

Таким образом, были получены и исследованы лучевые структуры изотропного источника излучения. В отличие от работ [7-8] положение источника излучения выбиралось различное: как выше, так и ниже максимума электронной концентрации. Исследовано влияние периодической структуры максимума слоя в экваториальной зоне на распространение декаметровых радиоволн. Рассмотрены особенности просачивания излучения через максимум слоя F. Полученные результаты помогают в полной мере исследовать особенности распространения коротковолновых радиосигналов в ионосферной плазме. С этой целью авторами разработана динамическая модель лучевого распространения радиоволн [9-10].

### Литература

1. Казанцев А.Н., Лукин Д.С., Спиридонов Ю.Г. Метод исследования распространения радиоволн в неоднородной магнитоактивной ионосфере. // Космические исследования, 1967. Т. 5. Вып. 4. С. 593–600.
2. Лукин Д.С., Спиридонов Ю.Г. Применение метода характеристик для численного решения задач распространения радиоволн в неоднородной и нелинейной среде. // Радиотехника и электроника, 1969. Т. 14. № 9. С. 1673–1677.
3. Куницын В.Е., Е.Д.Терещенко, Е.С.Андреева. Радиотомография ионосферы. М., Физматлит, 2007, 345 с.
4. Andreeva E.S., Franke S.J., Kunitsyn V.E., Yeh K.C. Some features of the Equatorial Anomaly revealed by Ionospheric Tomography, Geophysical Research Letters, Vol.27, No 16, P. 2465-2468, 2000.
5. Franke S.J., Yeh K.C., Andreeva E.S., Kunitsyn V.E. A study of the equatorial anomaly ionosphere using tomographic images, Radio Science, 2003, v. 38, No.1, p.1011-1020.
6. Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Franke S.J., Yeh K.C. Tomographic investigations of temporal variations of the ionospheric electron density and the implied fluxes // Geophysical Research Letters, 2003, V.30, No.16, 1851-1854.
7. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В. Исследование особенностей распространения коротких радиоволн в неоднородной анизотропной ионосфере. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2009. Т.14. № 8. С. 17-26.
8. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В. Моделирование лучевой и каустической структуры электромагнитных полей по данным радиотомографии ионосферы в окрестности экваториальной аномалии. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2010. Т.15. № 8. С. 5-11.
9. Крюковский А.С., Кирьянова К.С. Особенности лучевого распространения радиоволн в окрестности экваториальной аномалии. //Труды XII международной научной конференции «Цивилизация знаний: проблема человека в науке XXI века», Москва, 22-23 апреля 2011 г.– Часть II.– М.: РосНОУ, 2011.– С. 15–19.
10. Крюковский А.С., Кирьянова К.С. Динамическое моделирование распространения радиоволн в окрестности экваториальной аномалии на основе метода бихарактеристик // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т.16. № 8. С. 21-25.