

А.С. Крюковский¹
Д.С. Лукин²
Д.В. Растягаев³

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОРОТКИХ РАДИОВОЛН

Работа посвящена исследованию влияния локальных неоднородностей ионосферы на особенности распространения радиоволн. В статье методом бихарактеристик было исследовано распространение электромагнитных волн в неоднородной ионосфере с учетом влияния магнитного поля Земли. В работе рассмотрены особенности лучевого распространения обыкновенной и необыкновенной электромагнитных волн в анизотропной ионосферной плазме при наличии локальных неоднородностей. Обнаружены сложные каустические фокусировки каспидного типа. Исследованы случаи неоднородностей как увеличивающих, так и понижающих электронную концентрацию ионосферной плазмы. Выполнено моделирование лучевых траекторий в ионосфере со слоями F и E, а также в случае присутствия одновременно нескольких локальных неоднородностей. Выявлено устойчивое образование лучевых петель в ионосфере – ионосферный аттрактор.

Ключевые слова: распространение радиоволн, модель ионосферной плазмы, метод бихарактеристик, моделирование лучевой структуры, каустические особенности, ионосферный аттрактор.

A.S. Kryukovsky
D.S. Lukin
D.V. Rastyagaev

THE RESEARCH OF THE INFLUENCE OF LOCAL NON-HOMOGENEITIES IN THE IONOSPHERE PLASMA ON RADIO SHORT-WAVE PROPAGATION

This work is devoted to research of the influence of local non-homogeneities on ionospheres on feature of radiowave propagation. In the article EM wave propagation had been investigated by the bi-characteristic method to a non-uniform ionosphere in view of influence of the Earth magnetic field. In work singularities of ray propagation of ordinary and non-ordinary electromagnetic waves in an anisotropic ionosphere plasma are considered at the presence of local non-homogeneities. It is found out the complex caustic focusing such as the cuspidal catastrophes. The cases of non-homogeneities both increasing, and lowering of electronic concentration in the ionosphere plasma are investigated. The modeling of ray trajectories in an ionosphere with layers F and E is executed, and also in case of the presence of simultaneously several local non-homogeneities. Steady formation of ray loops to an ionosphere – “ionosphere attractor” is revealed.

Keywords: radiowave propagation, model of ionosphere plasma, method of bi-characteristics, modeling of ray structure, caustic singularities, ionosphere attractor

Настоящая работа посвящена исследованию влияния локальных неоднородностей ионосферы на особенности распространения радиоволн и продолжает работы [1–4], в которых методом би-

характеристик было исследовано распространение электромагнитных волн в неоднородной ионосфере с учетом влияния магнитного поля Земли, а также рассмотрены особенности распространения обыкновенной и необыкновенной составляющих электромагнитного поля как с учетом, так и без учета кривизны поверхности Земли на односкачковых и многоскачковых трассах. Актуальность исследования распространения электромагнитных волн в ионосферной плазме определяется необходимостью решения задач радиолокации, дальней радиосвязи, радионавигации, а также необходимостью диагностики структуры среды распространения: тропосферы, ионосферы или магнитосферы. Традиционными методами

¹ Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных технологий и естественно-научных дисциплин НОУ ВПО «Российский новый университет».

² Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой телекоммуникаций средств связи и информационных технологий в экономике и управлении НОУ ВПО «Российский новый университет».

³ Кандидат физико-математических наук, доцент, начальник отдела управления информатизации НОУ ВПО «Российский новый университет».

исследования распространения радиоволн в ионосфере Земли являются лучевые подходы, наиболее важным из которых является метод бихарактеристик, разработанный Д.С. Лукиным [5].

В работе [5] показано, что бихарактеристическую систему уравнений можно представить в виде:

$$\frac{\delta \bar{k}}{\delta \tau} = \frac{\partial \omega^2 \varepsilon}{\partial \bar{\rho}} \left(\frac{\partial \omega^2 \varepsilon}{\partial \omega} \right)^{-1},$$

$$\frac{\delta \bar{\rho}}{\delta \tau} = \left(2\chi^2 \bar{k} - \frac{\partial \omega^2 \varepsilon}{\partial \bar{k}} \right) \left(\frac{\partial \omega^2 \varepsilon}{\partial \omega} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где $\bar{k} = (k_x, k_y, k_z)$ – волновой вектор;

$\bar{r} = (x, y, z)$ – координаты точки наблюдения;

ω – круговая частота излучения;

$c = 2,997925 \cdot 10^{10}$ см/с – скорость света;

t – параметр вдоль лучевой траектории;

$\varepsilon \equiv \varepsilon(\bar{r}, \bar{k}, \omega)$ – эффективная диэлектрическая проницаемость среды распространения.

Для магнитоактивной среды эффективная диэлектрическая проницаемость может быть представлена в виде (см., например [6, 7]):

$$\varepsilon_{\pm} = 1 - \frac{2\nu(1-\nu)}{2(1-\nu) - u \sin^2 \alpha \pm \sqrt{u^2 \sin^2 \alpha + 4\nu(1-\nu)^2 \cos^2 \alpha}}, \quad (2)$$

где $\nu = \frac{\omega_p^2}{\omega^2} = \frac{4\pi e^2 N}{m_e \omega^2}$, $u = \frac{\omega_H^2}{\omega^2} = \frac{e^2 H_0^2}{m_e^2 c^2 \omega^2}$, (3)

$e = 4,8029 \cdot 10^{-10}$ СГСЭ – заряд электрона;

$m_e = 9,108 \cdot 10^{-28}$ г – масса электрона;

H_0 – абсолютная величина напряженности магнитного поля Земли;

N – профиль электронной концентрации.

Угол α – это угол между волновым вектором и вектором напряженности магнитного поля Земли $\vec{H}_0 = (H_{0x}, H_{0y}, H_{0z})$. Следовательно:

$$\cos \alpha = \frac{\dot{I}_{0x} k_x + \dot{I}_{0y} k_y + \dot{I}_{0z} k_z}{H_0 |\vec{k}|}. \quad (4)$$

Знак «+» соответствует обыкновенной волне, а знак «-» – необыкновенной волне.

Предполагается, что источник излучения точечный, расположен в начале координат ($\vec{r}(0) = 0$), причем начальный волновой вектор параметрически зависит от углов выхода луча (см. рис. 1):

$$k_x(0) = \frac{\omega}{c} \cos \zeta \cos \eta, \quad k_y(0) = \frac{\omega}{c} \sin \zeta \cos \eta,$$

$$k_z(0) = \frac{\omega}{c} \sin \eta. \quad (5)$$

В данной работе рассмотрено коротковолновое распространение в случае, когда профиль электронной концентрации двухслойной ионосферной плазмы имеет вид:

$$N(\vec{r}) = N_0 \left\{ \tilde{N}_F + \beta \tilde{N}_E + \sum_{i=1}^u F_i(x, y, z) \right\}, \quad (6)$$

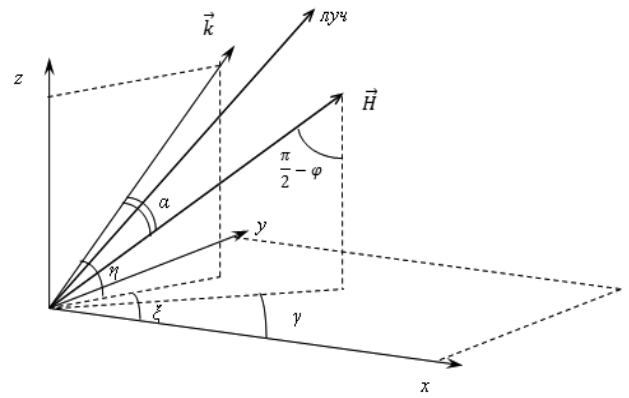


Рис. 1

где функции:

$$F_i(x, y, z) = \beta_{loc}^i \exp \left[- \left(\left(\frac{x - x_{loc}^i}{x_{m3}^i} \right)^2 + \left(\frac{y - y_{loc}^i}{y_{m3}^i} \right)^2 + \left(\frac{z - z_{loc}^i}{z_{m3}^i} \right)^2 \right) \right] \quad (7)$$

описывают локальные неоднородности эллипсоидальной формы среды распространения, величина

$$\tilde{N}_E = \exp \left[\frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{z - z_{02}}{z_{m2}/2} \right) - \sec \chi \exp \left(- \left(\frac{z - z_{02}}{z_{m2}/2} \right) \right) \right] \right] \quad (8)$$

– это нормированное значение электронной концентрации слоя E , а величина

$$\tilde{N}_F = \exp \left[- \left(\frac{z - z_{01}}{z_{m1}} \right)^2 \right] \quad (9)$$

нормированное значение электронной концентрации слоя F_2 .

Здесь:

z_{01} – высота максимума основного слоя F_2 ,

z_{m1} – условная полутолщина основного слоя F_2 ,

z_{02} – высота максимума нижнего слоя E ,

z_{m2} – условная полутолщина нижнего слоя E ,

(расстояние от высоты максимума вниз, на котором электронная концентрация падает в e раз);

β – безразмерный коэффициент, характеризующий степень ионизации нижнего слоя по отношению к основному;

N_0 – электронная концентрация в максимуме основного слоя.

В работе, если не оговорено иное, при численном моделировании применялись следующие значения перечисленных выше параметров: $N_0 = 2 \cdot 10^6$ см⁻³, $H_0 = 0,36$ Э, $z_{m1} = 100$ км, $z_{m2} = 10$ км, $z_{01} = 300$ км, $z_{02} = 100$ км, $\zeta = 0$, $\chi = 0$. Таким образом, предполагалось, что изначально распространение осуществляется в плоскости (x, z) . В настоящих расчетах амплитуда напряженности магнитного поля предполагалась постоянной, а ориентация относительно системы координат задавалась двумя углами γ и φ .

$$H_{0x} = H_0 \cos \gamma \cos \varphi, \quad H_{0y} = H_0 \cos \gamma \sin \varphi, \quad (10)$$

$$H_{0z} = H_0 \sin \gamma.$$

Рассмотрим результаты численного моделирования. На рис. 2 показано модельное распределение электронной концентрации по высоте

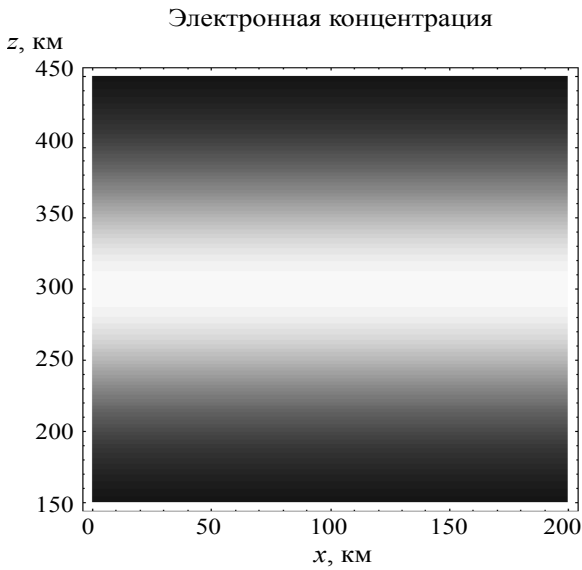


Рис. 2а

в ионосферном плазменном слое ($\beta = 0$) при отсутствии (а) и наличии (б) локальной неоднородности.

На рис. 3 приведен результат моделирования лучевой структуры в плоскости (x, z) в случае распространения необыкновенной волны при отсут-

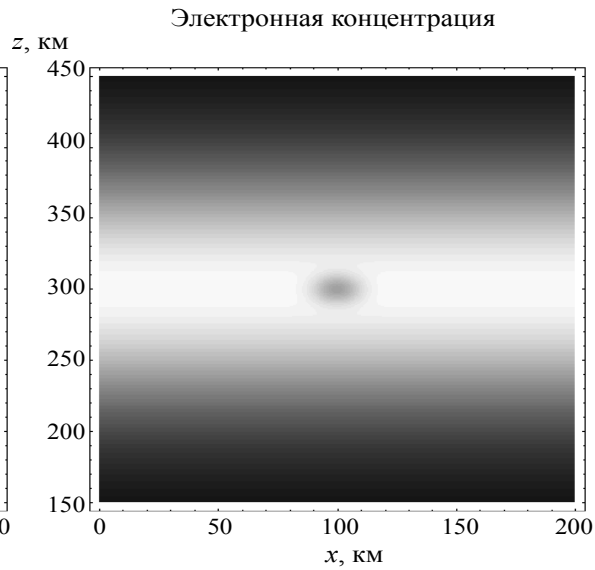


Рис. 2б

ствии локальных возмущений. Часть лучей при углах падения, близких к вертикальному, проходит ионосферный слой, а остальные возвращаются на Землю и образуют каустическое острие. Здесь направление вектора напряженности магнитного поля определяется углами $\gamma = 3\pi/4$ и $\varphi = \pi/2$.

При возникновении локальной области пониженной электронной концентрации (в расчетах выбраны параметры $\mu = 1, x_{m3} = y_{m3} = z_{m3} = 10$ км) на высоте максимума слоя ($x_{loc} = 100$ км, $z_{loc} = 300$ км, $y_{loc} = 0, \beta_{loc} = -0,3$) возникает возмущение лучевой структуры (рис. 4). На рисунке видно, что неоднородность заставляет луч огибать себя не-

сколько раз. При этом на Земле образуется дополнительная область «мертвой зоны».

На рис. 5 и 6 сопоставлены лучевые структуры в проекции на плоскость (y, z), образующиеся в невозмущенном (рис. 5) и возмущенном случаях (рис. 6). Если бы магнитное поле отсутствовало, все лучи в этой плоскости соответствовали бы линии $y = 0$. При наличии магнитного поля лучи отклоняются влево, а после выхода из ионосферы движутся вдоль оси y , но уже со смещением. Из сравнения рисунков видно, что неоднородность нарушает регулярность лучевой структуры, и по-скольку луч огибает неоднородность, прежде чем

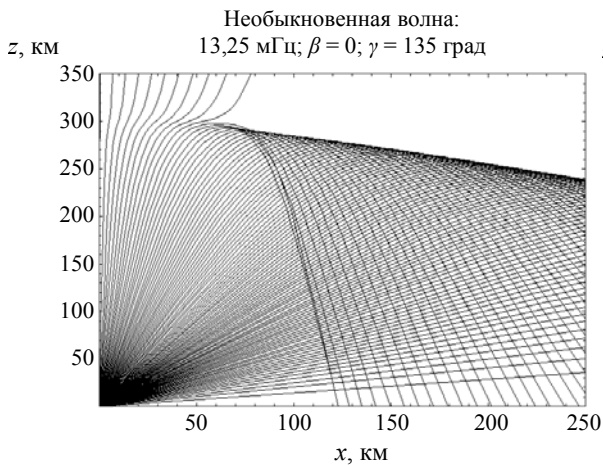


Рис. 3

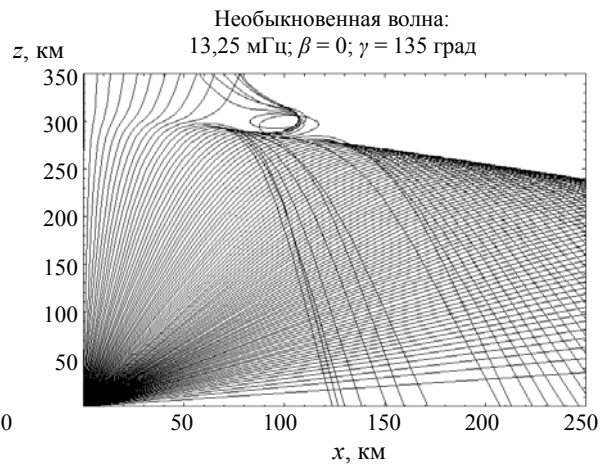


Рис. 4

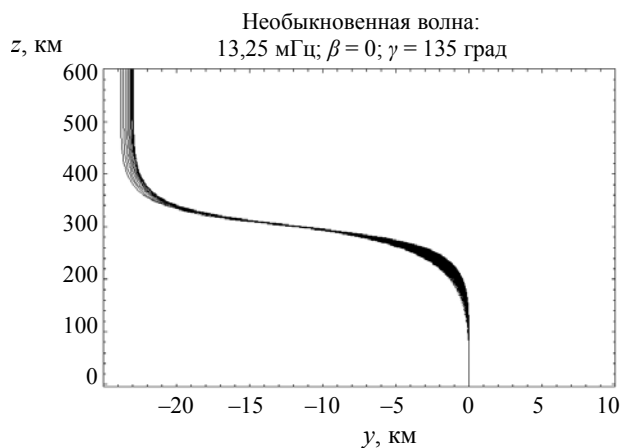


Рис. 5

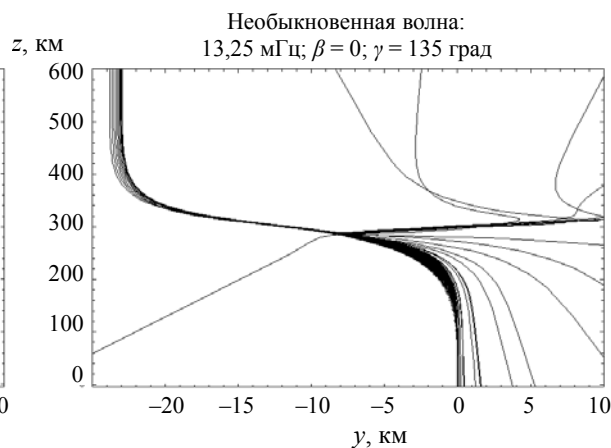


Рис. 6

продолжить свой путь, он отклоняется в самых различных направлениях.

На рис. 7 и 8 показаны лучевые структуры в горизонтальной проекции, то есть в плоскости (x, y) в невозмущенном и возмущенном случаях, соответственно. Видно, что в невозмущенном случае лучи в этой плоскости также образуют каустическое острие, как и на рис. 3. В возмущенном

случае луч не только выходит из плоскости распространения (рис. 7), но вращается в плоскости (x, y) (рис. 8), как и на рис. 4.

На рис. 10–12 показана лучевая структура необыкновенной волны в случае, когда угол $\gamma = \pi/4$, а в ионосфере имеются три разнесенные друг относительно друга сферические локальные неоднородности. Геометрические параметры неоднород-

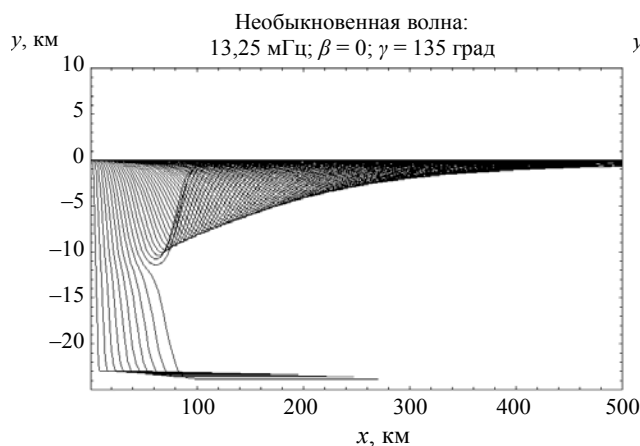


Рис. 7

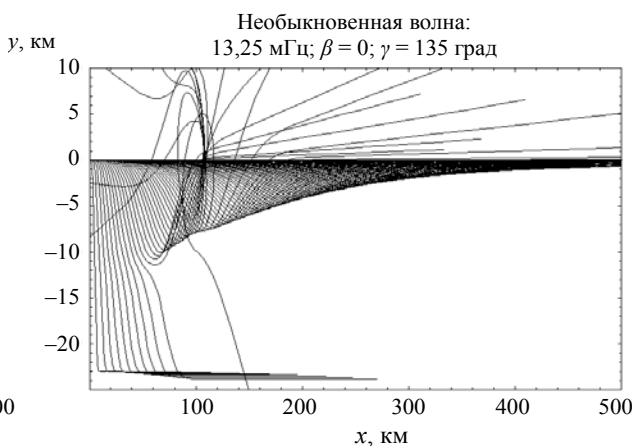


Рис. 8

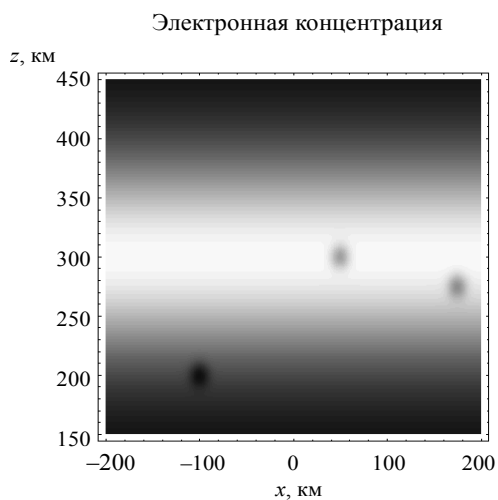


Рис. 9

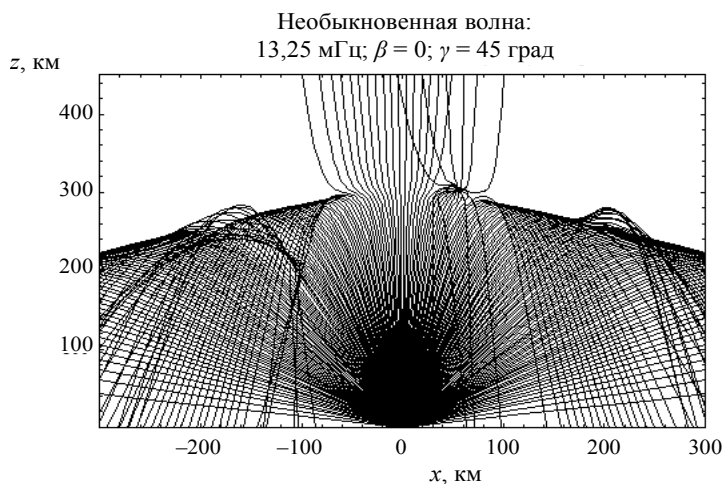


Рис. 10

ностей были выбраны такие же, как и выше, а центры расположены в точках с координатами (50 км, 0 км, 300 км), (175 км, 0 км, 275 км) и (-100 км, 0 км, 200 км), соответственно (см. рис. 9).

Рассмотрим результаты моделирования лучевой структуры в этом случае. В плоскости (x, z) центральная неоднородность стягивает лучи в «узел» (рис. 10), а боковые неоднородности формируют дополнительные каустические структуры

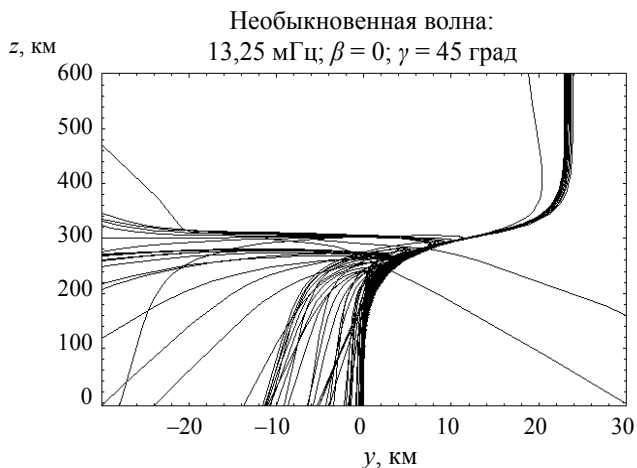


Рис. 11

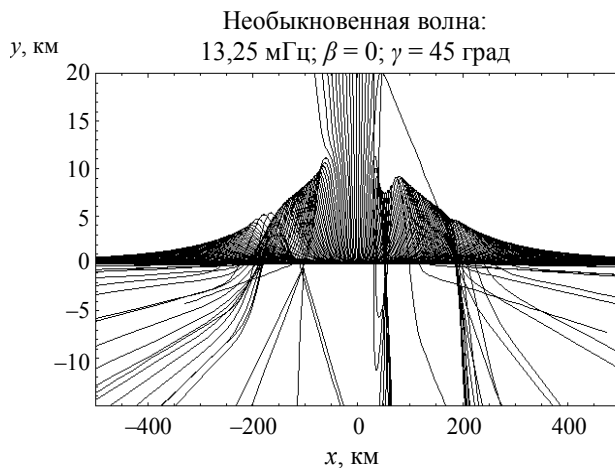


Рис. 12

Рис. 13–15 представляют лучевую структуру обыкновенной волны при тех же параметрах неоднородностей и той же рабочей частоте. Следует отметить, что лучевая структура вместе с каусти-

ками как бы подтянулась вверх (рис. 13), причем доля лучей, проходящих ионосферу, заметно увеличилась. Качественно изменилась лучевая структура в плоскости (x, y) (рис. 15).

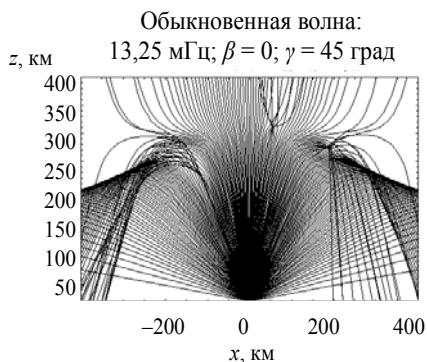


Рис. 13

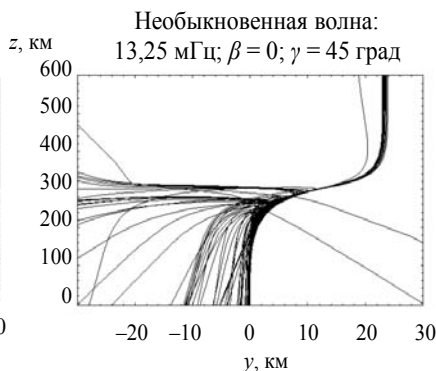


Рис. 14

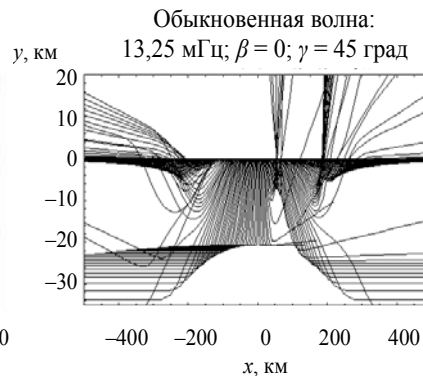


Рис. 15

Рассмотрим случай, когда локальные неоднородности присутствуют в двухслойной модели ($\beta = 0,4$). На рис. 16 представлены линии равного уровня модельной электронной концентрации с включенными неоднородностями, центры которых расположены в точках с координатами (165 км, 0 км, 105 км) и (100 км, 0 км, 290 км).

На рис. 17–19 показана лучевая структура поля необыкновенной волны в случае, когда все лучи отражаются от ионосферы, поскольку рабо-

чая частота равна 13 МГц. Видно (см. рис. 17 и 18), что в плоскости (x, z) над каустикой возникает область, где лучи «наматываются» на неоднородность («петли» лучей), причем они наматываются на неоднородность не только в одной плоскости, а как нитки на клубок [см. рис. 19, то есть плоскость (x, y)]. Таким образом, лучевые петли возникают не только в окрестности каустического острия, как в предыдущем случае, но и при полном отражении лучей от ионосферы в окрестности

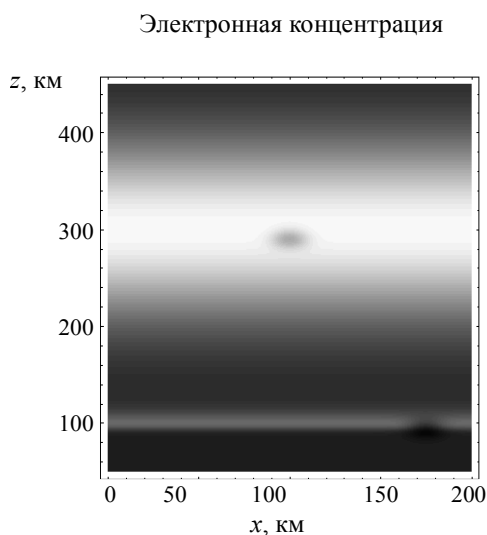


Рис. 16

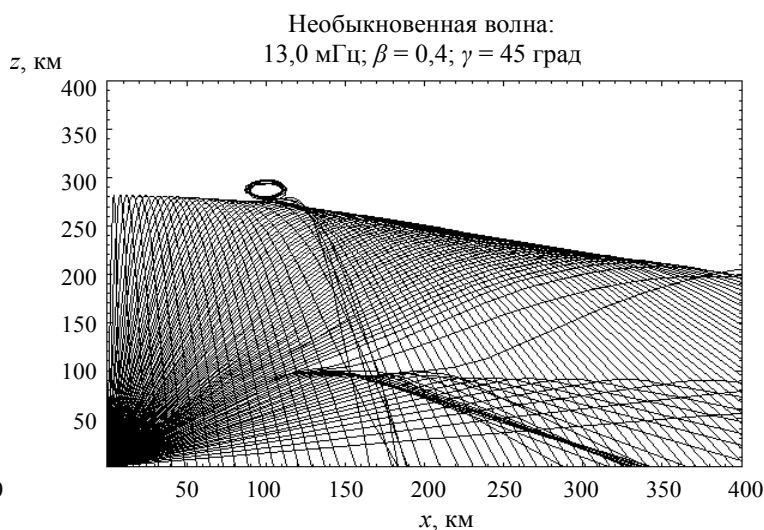


Рис. 17

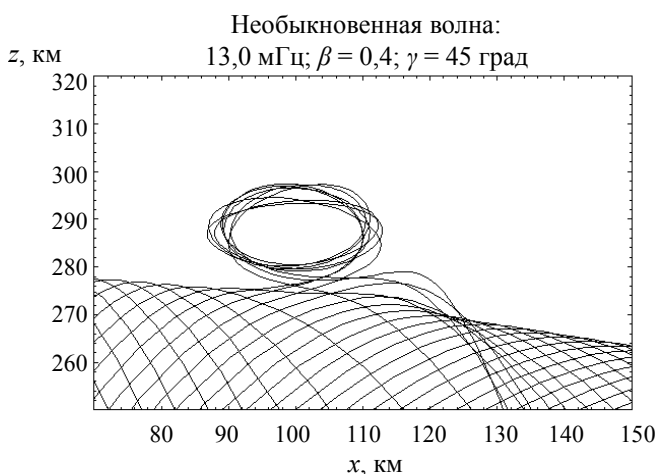


Рис. 18

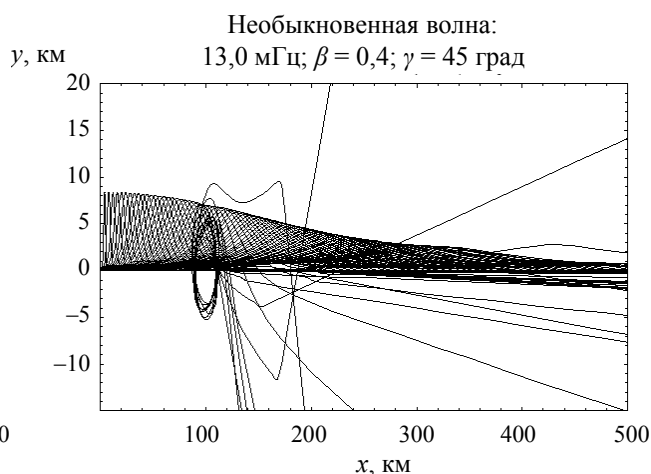


Рис. 19

гладкой каустики. Отсюда можно сделать вывод, что ионосферный аттрактор – устойчивое образование при наличии локальных неоднородностей.

Локальная неоднородность, расположенная в окрестности слоя E , приводит к небольшому изменению каустической структуры, создаваемой этим слоем (рис. 17).

Рассмотрим теперь случай, когда область повышенной электронной концентрации лежит вне слоя (рис. 20): $x_{loc} = z_{loc} = 100$ км, $y_{loc} = 0$, $\beta_{loc} = 0,3$. Тогда неоднородность выталкивает лучи из области распространения, и на Земле возникают области с пониженной напряженностью электромагнитного поля (см. рис. 21). В данном примере длина этой зоны – более 200 км.

Вместо обычного каустического острия возникает структура, соответствующая особенности типа «ласточкин хвост» – A_4 .

Рис. 22 иллюстрирует выход луча из плоскости распространения в этом случае. Следует осо-

бо отметить точки возврата лучевых траекторий в плоскости (y, z) , хорошо видные на рисунке и характерные для лучей, отразившихся от слоя. На рис. 23 представлена лучевая структура в плоскости (x, y) . Видна сложная каустическая структура лучей, отразившихся от ионосферы, с образованием волновой каспоидной катастрофы «ласточкин хвост». Эти лучи сначала смещаются в боковую плоскость, а затем частично возвращаются. Лучи, прошедшие ионосферу, смещаются в боковую плоскость на величину, определяемую углом выхода луча. Чем направление луча ближе к вертикальному, тем смещение меньше. Выйдя из ионосферы, лучи движутся параллельно.

Рассмотрим теперь случай, когда величина максимума ионосферного слоя периодически меняется (11).

$$N(\vec{r}) = N_0 \left(\tilde{N}_F + \beta \tilde{N}_E \right) \left(1 + \beta_1 \sin \left(\frac{\pi x}{2x_1} \right) \right), \quad (11)$$

$\beta_1 = -0,3, x_1 = 80$ км.

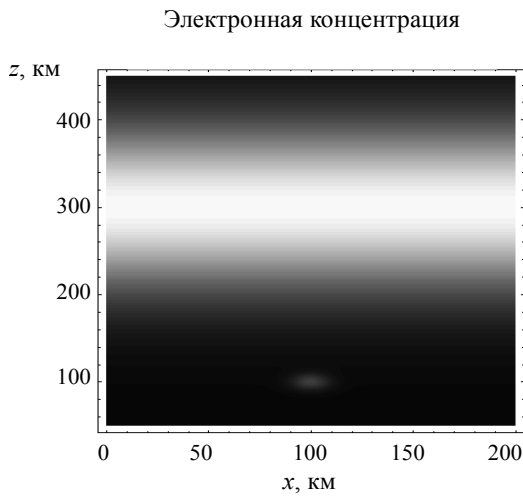


Рис. 20

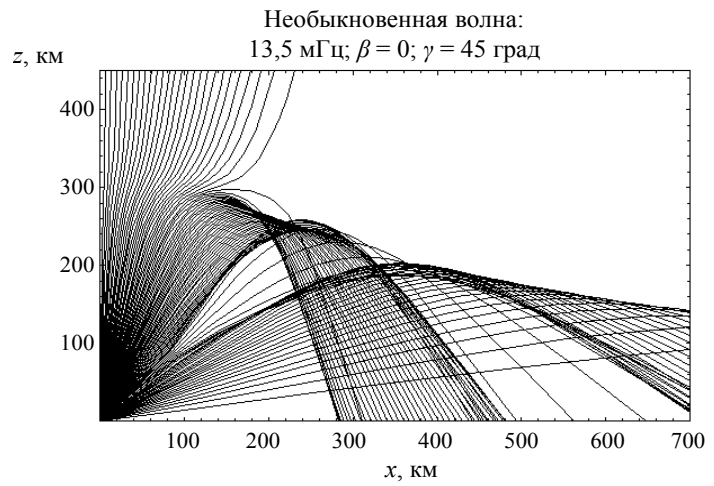


Рис. 21

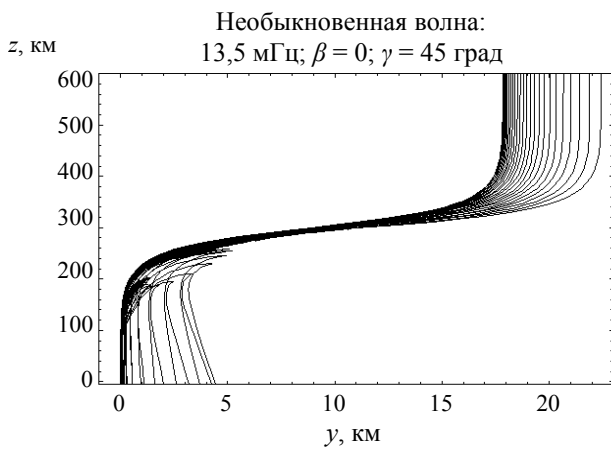


Рис. 22

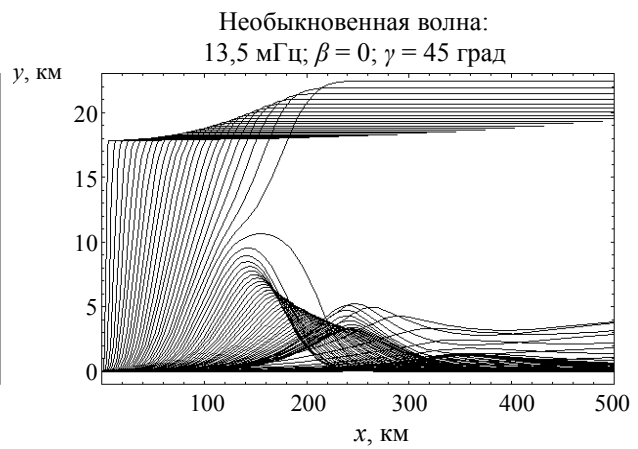


Рис. 23

На рис. 24 показано модельное распределение электронной концентрации справа и над источником излучения с рабочей частотой 13,5 МГц. Из результатов моделирования видно (рис. 25), что за счет понижения максимума электронной кон-

центрации над источником необыкновенная волна, проходя ионосферный слой, фокусируется. В этом случае имеет место инверсия лучевой структуры. В проекции на плоскость (y, z) (см. рис. 26) все лучи расщепляются.

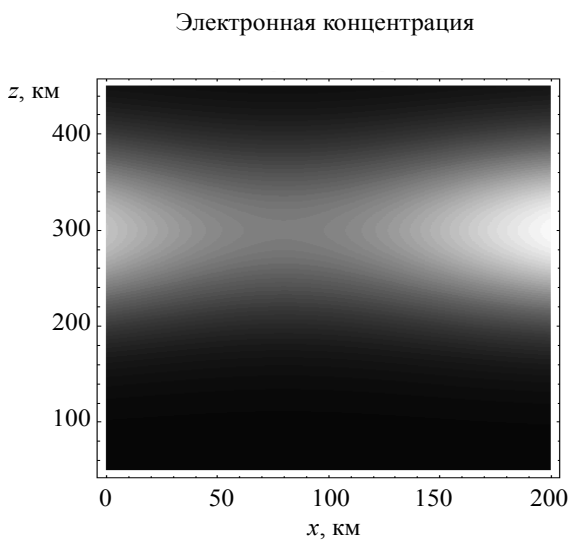


Рис. 24

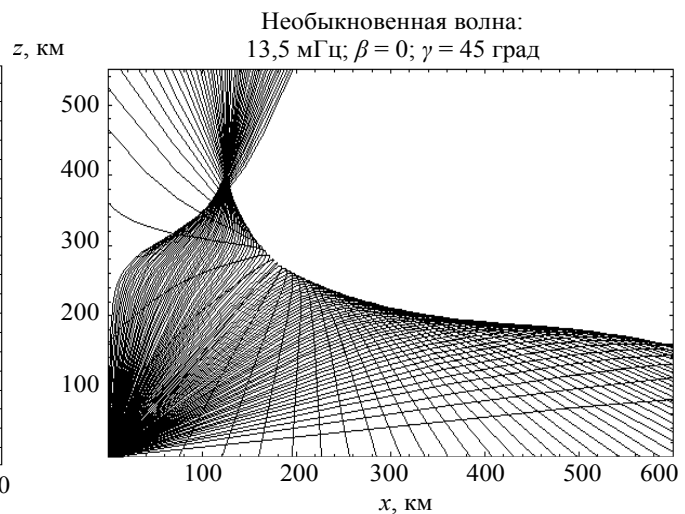


Рис. 25

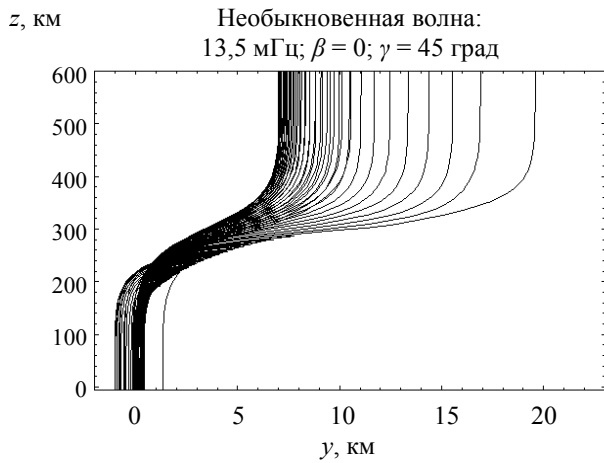


Рис. 26

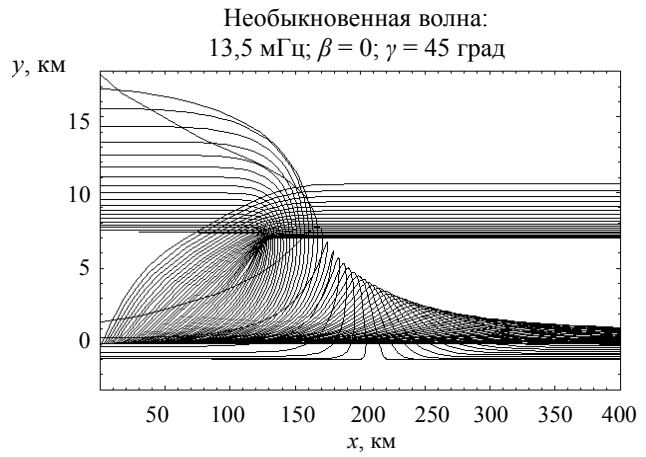


Рис. 27

Резко изменяется и структура лучей в плоскости (x, y) . В результате инверсии при выходе из области фокусировки часть лучей отправляется налево, а часть – направо.

Как и в работах [1–4], рассмотрим модифи-

кацию лучевой структуры «паук Д.С. Лукина» в присутствии локальной неоднородности. Начальное лучевое семейство образовано лучами, выходящими из источника в разные стороны почти вертикально ($\eta = 88^\circ$).

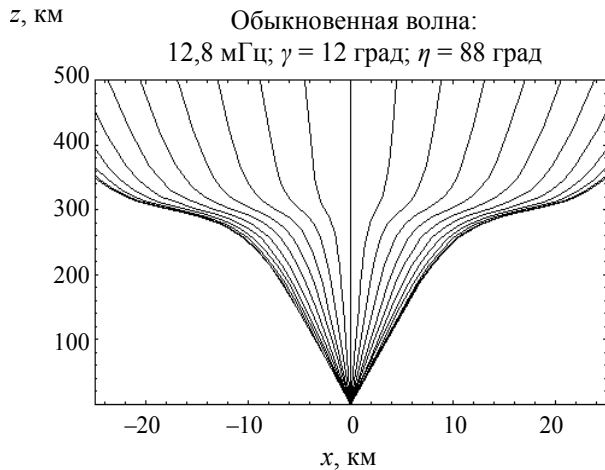


Рис. 28

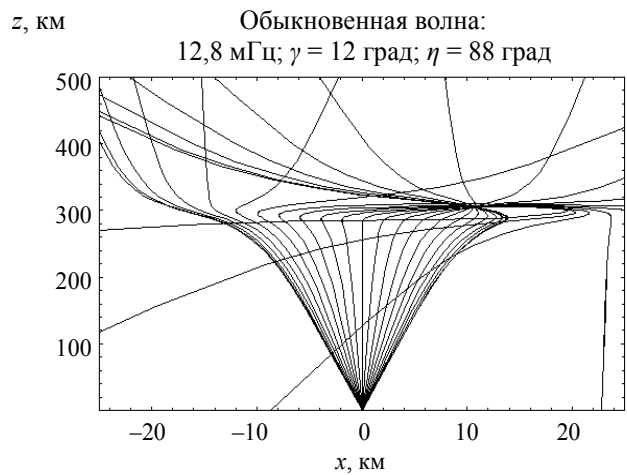


Рис. 29

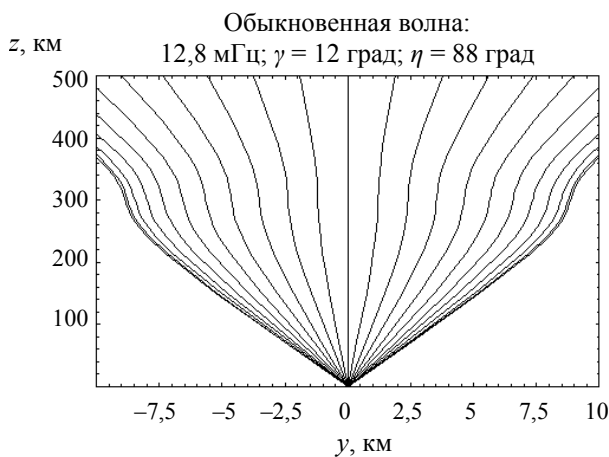


Рис. 30

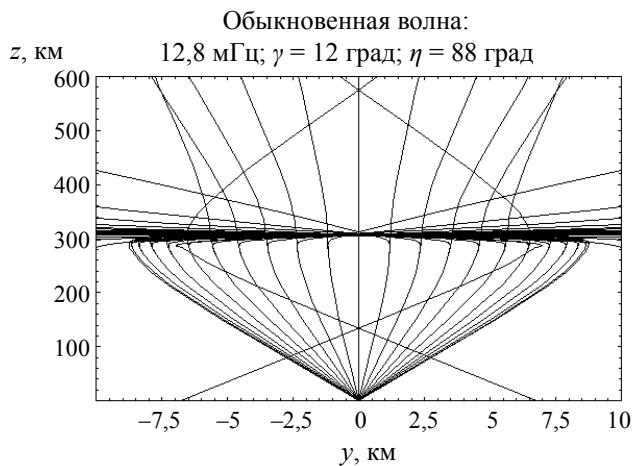
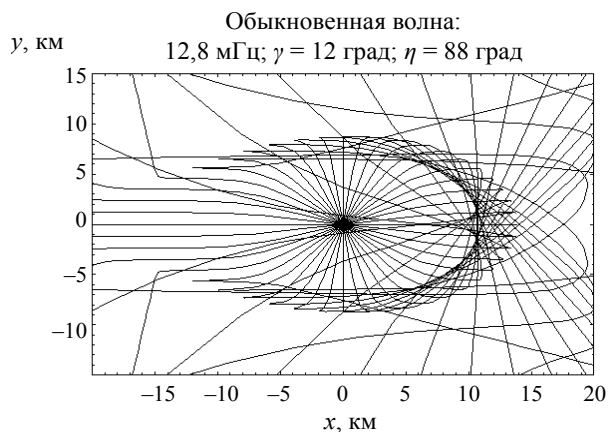
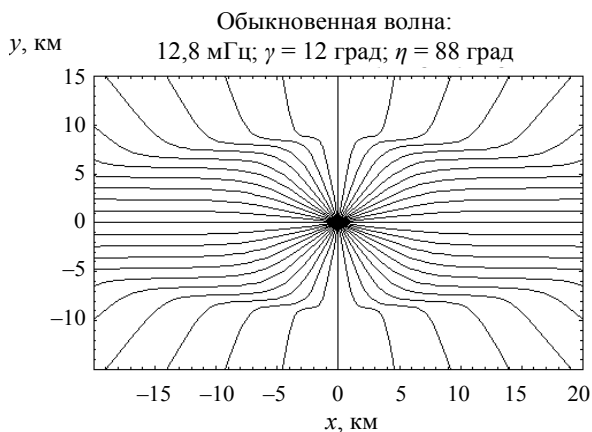


Рис. 31

На рис. 28, 30, 32 приведены лучевые структуры в плоскостях (x, z) , (y, z) и (x, y) в случае отсутствия локальной неоднородности. Рис. 32 соответствует структуре «паук Д.С. Лукина». Из рисунка видно, что лучи, вышедшие параллельно оси y , не отклоняются. Остальные лучи отклоняются, испытывая характерный изгиб.

На рис. 29, 31, 33 приведены результаты моделирования лучевых структур в плоскостях (x, z) , (y, z) и (x, y) при наличии локальной неоднородности, центр которой расположен в точке с координатами $(10 \text{ км}, 0 \text{ км}, 300 \text{ км})$. Неоднородность, разрушая регулярную структуру, как бы стягивает лучи (рис. 29). В проекции на плоскость (y, z) наличие неоднородности приводит к появлению фокусировки лучей на высоте 300 км (рис. 31), а в проекции на плоскость (x, y) возникает каустика с каустическим острием – структура, характерная для отражения лучей от вогнутой поверхности (рис. 33).



В настоящей работе рассмотрены особенности лучевого распространения обыкновенной и необыкновенной электромагнитных волн в анизотропной ионосферной плазме при наличии локальных неоднородностей. Обнаружены сложные каустические фокусировки типа катастроф кас-поидного типа. Рассмотрены случаи неоднородностей как увеличивающих, так и понижающих электронную концентрацию ионосферной плазмы. Исследованы модели со слоями F и E , а также – случаи присутствия одновременно нескольких локальных неоднородностей. Выявлено устойчивое образование лучевых петель в ионосфере – ионосферный аттрактор. Исследована модификация лучевой структуры «паук Д.С. Лукина» в присутствии локальной неоднородности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №№ 09-07-00189, 10-02-01103).

Литература

1. Крюковский, А.С., Лукин, Д.С., Растягаев, Д.В. Математическое моделирование распространения радиоволн в анизотропной неоднородной ионосфере // Вестник Российского нового университета : серия «Управление, вычислительная техника и информатика» / М. : РосНОУ, 2009. Выпуск 2. – С. 7–14.
2. Крюковский, А.С., Лукин, Д.С., Растягаев, Д.В. Исследование особенностей распространения коротких радиоволн в неоднородной ани-

тропной ионосфере // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2009. – Т. 14. – № 8. – С. 17–26.

3. Kryukovsky, A.S., Lukin, D.S., Rastyagaev, D.V. Caustic Singularities Arising at Propagation of Short Radiowaves in Anisotropic Ionospheric Plasma [Электронный ресурс]: // PERS Proceedings, August 18–21, Moscow, RUSSIA, 2009. PP. 1998–2001. – Режим доступа <http://pers.mit.edu/persproceedings/pers2k9MoscowProc.php>, свободный.

4. Крюковский, А.С., Лукин, Д.С., Растягаев, Д.В. Моделирование каустических структур при распространении электромагнитных волн в неоднородной анизотропной плазме // Труды X международной научной конференции «Цивилизация знаний: глобальный кризис и инновационный выбор России», секция «Математическое и численное моделирование», Москва, 24–25 апреля 2009 г. – Часть I. – М. : РосНОУ, 2009. – С. 288–296.

5. Лукин, Д.С., Спиридонов, Ю.Г. Применение метода характеристик для численного решения задач распространения радиоволн в неоднородной и нелинейной средах // Радиотехника и электроника. – 1969. – Т. 14. – № 9. – С. 1673–1677.

6. Лукин, Д.С., Палкин, Е.А. Численный канонический метод в задачах дифракции и распространения электромагнитных волн в неоднородных средах. – М. : МФТИ, 1982. – 159 с.

7. Дэвис, К. Радиоволны в ионосфере. – М. : Мир, 1972. – 502 с.