

К вопросу моделирования признаков ионосферных возмущений на ионограммах вертикального зондирования

О.А. Ларюнин, В.И. Куркин, А.А. Рыбкина, А.В. Подлесный

*Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова 126а.
E-mail: laroleg@iszf.irk.ru*

Появление серповидных треков на ионограммах вертикального зондирования может быть связана с многолучевостью, возникающей за счет боковых отражений на горизонтальных градиентах электронной концентрации. В этой связи в работе представлены результаты численного моделирования ионосферного распространения радиоволн в условиях горизонтально-неоднородной среды. Показана возможность образования петлеобразных траекторий. Рассмотрены динамические проявления перемещающихся ионосферных возмущений на ионограммах.

Ключевые слова: вертикальное зондирование, перемещающиеся ионосферные возмущения

On the modeling of signatures of traveling ionospheric disturbances on vertical ionograms

O.A. Laryunin, V.I. Kurkin, A.A.Rybkina, A.V.Podlesnyi

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk

The occurrence of cusp-like traces on vertical ionograms is usually associated with multiple propagation which is caused by off-vertical reflections from horizontal gradients of electron density. In this regard presented are results of numerical modeling of ionospheric radio wave propagation under the conditions of non-stratified medium. Demonstrated is the possibility of formation of loop-like ray paths. Considered are dynamical manifestations of traveling ionospheric disturbances on ionograms.

Keywords: vertical ionospheric sounding, traveling ionospheric disturbances

Введение

Признаки перемещающихся ионосферных возмущений на ионограммах разнообразны по своей структуре и динамическим проявлениям [1] и часто представляют собой дополнительные U-образные треки. Модельное описание такого рода треков (серпов) на ионограммах вертикального зондирования проводилось в ряде предшествующих работ [2–4]. Было показано, что серп (рис.1,2) связан с боковыми траекториями, возникающими вследствие появления вблизи максимума F2 слоя областей с повышенной или пониженной электронной концентрацией. Как показывает моделирование, при горизонтальном движении возмущения к ионозонду имеет место сползание серпа вниз и влево по ионограмме вдоль основного трека. Выбор модели возмущения здесь не носит принципиального характера: в литературе использовались как волнообразные модели для описания периодических событий [5], так и, например, гауссиан для моделирования одиночных дополнительных треков. В частности, в

работе [4] для решения обратной задачи было проведено имитационное моделирование, т. е. фитирование путем варьирования заложенных в модель параметров возмущения.

Описание модели и численное моделирование

Рассмотрим часто наблюдаемый на ионограммах случай, когда в результате прохождения U-образной структуры устанавливается повышенная критическая частота. Такого рода событие проиллюстрировано на рис.1 и рис.2. До 12:01 UT наблюдались спокойные ионограммы (см. рис.1, левая панель). После 12:13 UT так же имеют место спокойные ионограммы, но со сдвигом критической частоты (рис.1, правая панель). В этой связи представляется обоснованным предположить появление области с повышенной электронной концентрацией над точкой зондирования.

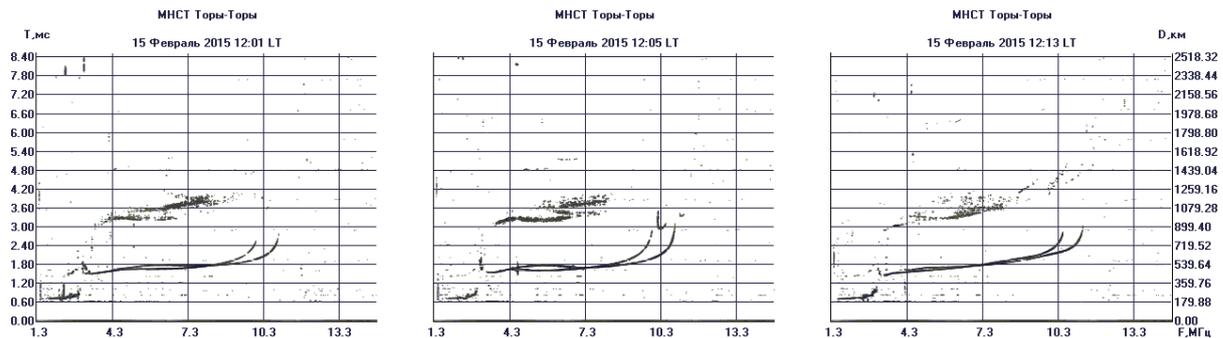


Рис. 1. Появление U-образного трека на ионограмме, 15 февраля 2015 г.

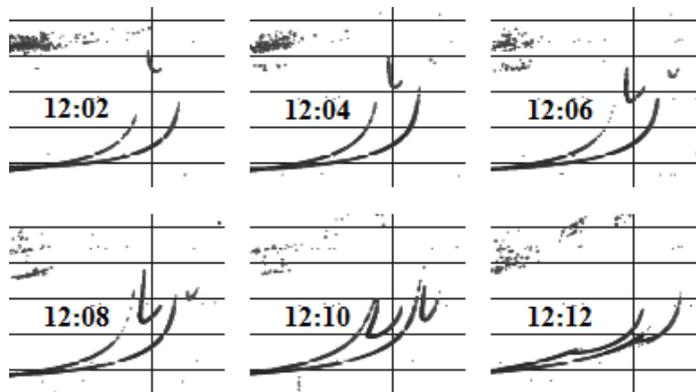


Рис. 2. Динамика серпа на ионограммах.

На рис.3а показаны характерные лучевые траектории для модели вида (1):

$$\begin{cases} f_p(x, z) = f_{p0}(z) \left(1 + \delta \text{Exp} \left(-\frac{(x-x_0)^4}{b^4} \right) \right), & x \leq x_0 \\ f_p(z) = f_{p0}(z)(1 + \delta), & x > x_0 \end{cases} \quad (1)$$

Здесь x и z соответственно – горизонтальная и вертикальная координаты; $f_{p0}(z)$ – фоновая плазменная частота; $\delta = 0.64$ – интенсивность возмущения; $x_0 = 150 \text{ км}$ – центр возмущения; $b = 70 \text{ км}$ – масштаб возмущения.

Параметр x_0 задает положение возмущения относительно приемника/передатчика так, что уменьшение x_0 приводит к сползанию серпа вниз и влево вдоль основного

трека ионограммы (рис.2). Действительно, приближение возмущения ведет к «укорачиванию» боковых траекторий и, соответственно, к уменьшению группового пути.

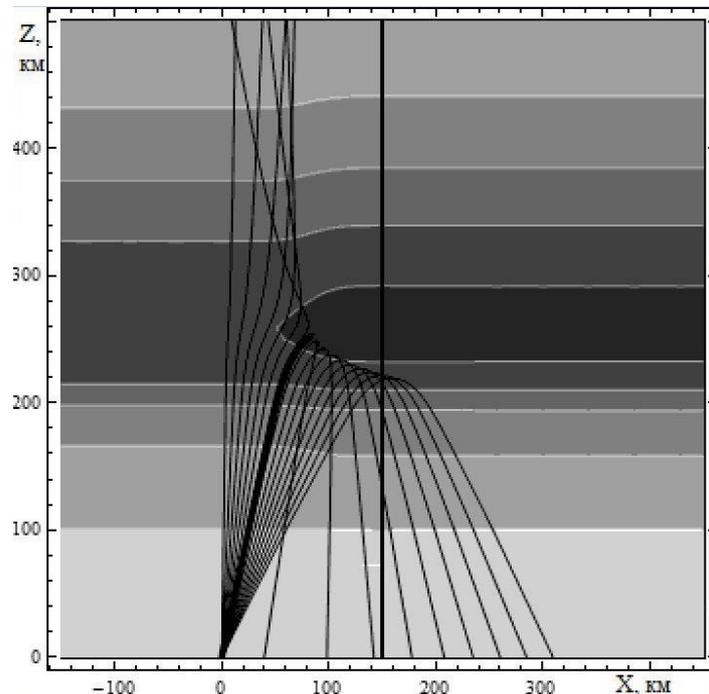


Рис.3. Траектории лучей для модели вида (1).

Помимо случая, показанного на рисунках 1 и 2, где серп находится «вне ионограммы», возможно также положение «внутри ионограммы». Встречаются также промежуточные случаи, когда прикритическая часть ионограммы рассекает серп на две части. На рис.4 представлены характерные ионограммы типа «критическая проходит через серп» (левая панель) и «серп внутри» (правая панель).

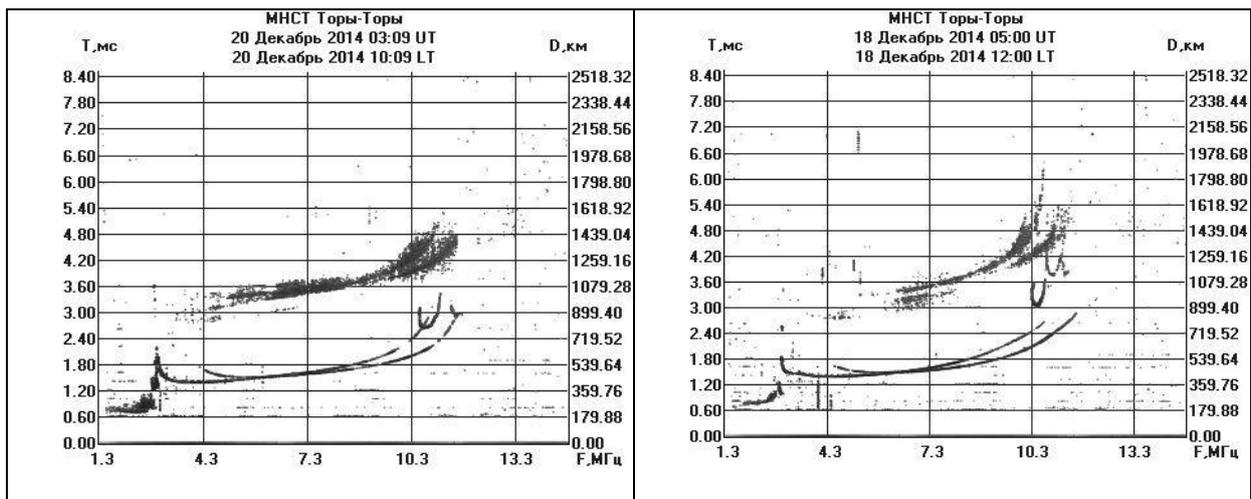


Рис. 4. Ионограммы вертикального зондирования с характерными серповидными структурами.

Такое разнообразие случаев не может быть описано простейшей моделью вида (1). В этой связи рассмотрим возмущение в виде «двух локализованных косинусов»:

$$f_p(x, z) = f_{p0}(z) \cdot \left[1 + \delta \cdot \exp\left(-\frac{(x-x_0)^4}{l^4}\right) \cdot \cos\left(2\pi \frac{x-x_0}{\lambda}\right) + \delta \cdot \exp\left(-\frac{(x-x_0+\Delta x)^4}{l^4}\right) \cdot \cos\left(2\pi \frac{x-x_0+\Delta x}{\lambda}\right) \right] \quad (2)$$

Здесь x_0 - варьируемый параметр, задающий горизонтальную координату центра первого возмущения, расстояние между возмущениями $\Delta x = 200$ км, горизонтальный радиус локализации каждого возмущения $l = 100$ км, длина волны возмущений $\lambda = 195$ км.

Варьирование центра возмущения x_0 приводит к смещению всей структуры относительно точки излучения/приема (начала координат). При этом расположение дополнительно трека на ионограмме меняется. Так, значению $x_0 = -20$ км соответствуют рис.5а, б: серп в этом случае полностью располагается слева от критической частоты.

Рис.5б демонстрирует лучевую картину для частоты 8.6 МГц. Основной трек ионограммы здесь образуют квазивертикальные траектории, тогда как серпу соответствуют большие значения групповых задержек, которые возникают за счет боковых отражений от удаленной по горизонтали структуры.

При горизонтальном смещении возмущения до $x_0 = 150$ км синтезированная ионограмма приобретает вид, показанный на рис.5в. Можно видеть, что в определенном частотном интервале имеют место три луча. Однако траекторный синтез показывает, что лучей, строго говоря, четыре. Это связано с взаимностью петлеобразного луча: если угол излучения задать равным углу прихода, то радиоволна будет распространяться в обратном направлении по той же траектории (рис.3г, $f = 8.42$ МГц).

Наконец, при последующем смещении отражающей структуры вправо до $x_0 = 175$ км многолучевость исчезает (рис.5д, е). На рис.5 е показано боковое отражение на частоте 9 МГц.

Помимо указанных различий, серпы также разнообразны по своим динамическим проявлениям [1]. Большинство случаев составляет классический серп, показанный на рис.2, когда имеет место сползание в область меньших групповых задержек и меньших частот (вниз и влево по ионограмме). Реже встречается случай движения серпа в противоположном направлении. Также интересен случай смены направления движения, когда серп, движущийся сверху вниз, останавливается и начинает движение в противоположном направлении. Отметим, что классификация по типам может быть продолжена, и может включать также сложные случаи в виде различных комбинаций и наложений серпов [1].

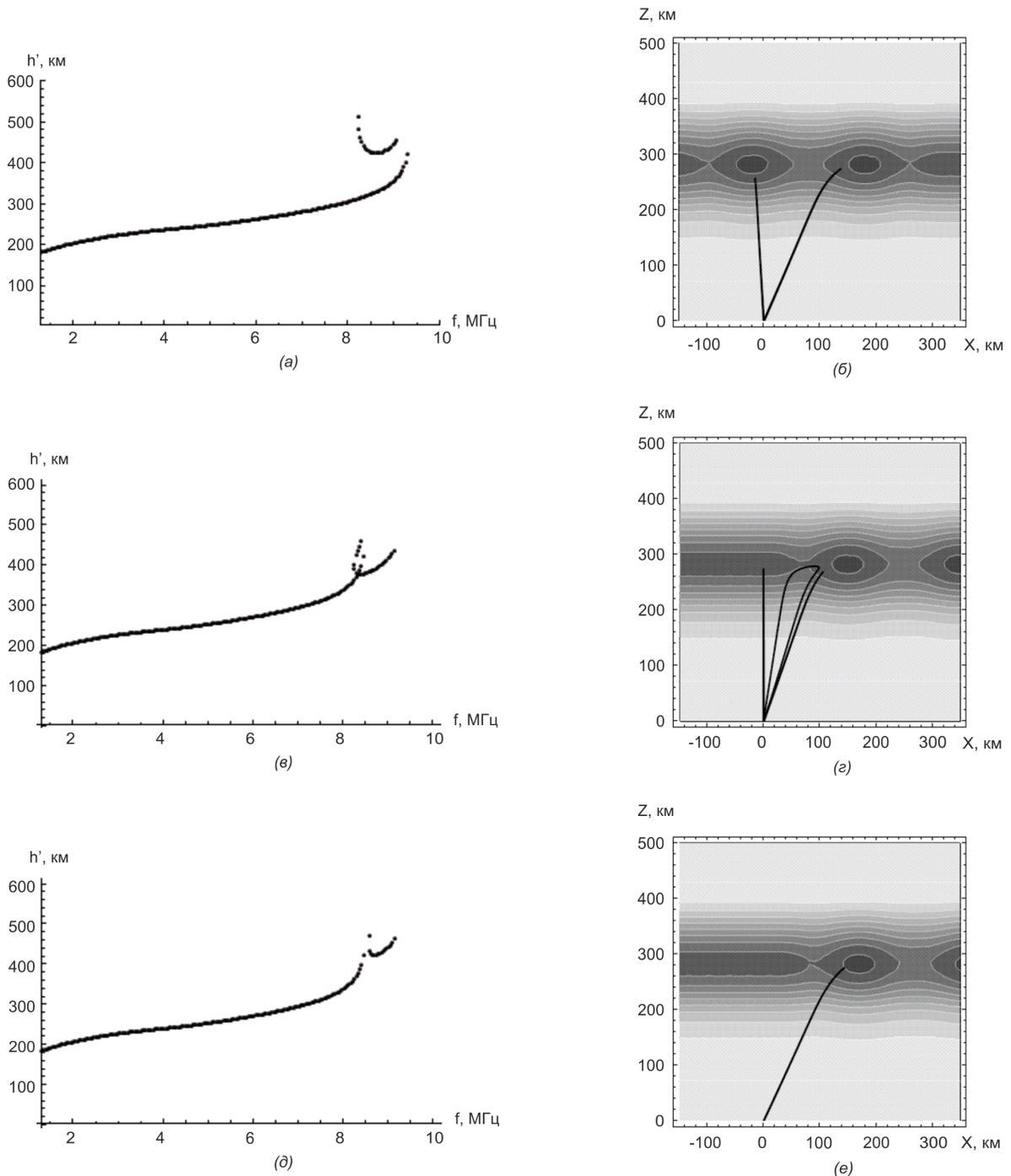


Рис.5. Синтезированные ионограммы и характерные лучевые траектории.

Выводы

На основе численного моделирования показана возможность образования невертикальных лучевых траекторий с отражением от областей с повышенной электронной концентрацией. Показана состоятельность как гауссоподобной модели возмущения, так и квазиволнообразной модели. Продемонстрировано качественное совпадение результатов моделирования с экспериментальными данными.

Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия №075-ГЗ/Ц3569/278).

Литература

1. Куркин В. И., Ларюнин О.А., Подлесный А.В., Пежемская М.Д., Чистякова Л. В. Морфологические особенности признаков перемещающихся ионосферных неоднородностей по данным слабонаклонного зондирования ионосферы // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 2. С. 158–163.
2. Lobb R.J., Titheridge J.E. The effects of travelling ionospheric disturbances on ionograms // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. 1977. Vol. 39, pp.129–138.
3. Cooper J., Cummack C.H. The analysis of travelling ionospheric disturbance with nonlinear ionospheric response // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. 1986. Vol. 48, № 1, pp.61–64.
4. Laryunin O.A. Studying characteristics of traveling ionospheric disturbances using U-shaped traces on vertical incidence ionograms // Advances in Space Research. 2021. Vol. 67. Iss. 3. P. 1085–1089.
5. Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Выборнов Ф.И., Першин А. В. Траекторный синтез ионограмм на слабонаклонной трассе в условиях волновых возмущений // Труды конференции РРВ–26, 1–6 июля 2019. Т. 1. С. 372–375.