

УДК 621.371.3, 550.388.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Я.С. Михайлов, В.И. Куркин

STUDY OF CHARACTERISTICS OF TRAVELING IONOSPHERIC DISTURBANCES

Ya.S. Mikhailov, V.I. Kurkin

На основе моделирования ионограмм наклонного зондирования и анализа экспериментальных данных зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ-сигналом проведено изучение характеристик перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) в северо-восточном регионе России. Реализована модель среды распространения с ПИВ волнового типа на базе международной справочной модели ионосферы (IRI-2001). В рамках геометрического подхода разработан алгоритм траекторного синтеза ионограмм, на основе которого исследовано влияние ПИВ на характеристики распространения на трассе Магадан–Иркутск. Выявлено изменение формы дистанционно-частотной характеристики распространения в зависимости от параметров ПИВ.

A study of characteristics of traveling ionospheric disturbances (TIDs) over north-eastern region of Russia was carried out on the base of modeling the oblique-incidence sounding (OIS) ionograms and experimental ionograms of ionosphere chirp sounding. The model of propagation medium with wave-like was developed the base of International Reference Ionosphere Model (IRI-2001). The TID impact on OIS ionograms for Magadan–Irkutsk path was studied using this model and ray tracing technique. Modifications of OIS ionogram shape along propagation path and dependence on TID parameters was revealed.

Распространение радиоволн декаметрового диапазона (ДКВ) в ионизированной части атмосферы Земли – ионосфере – обладает рядом интересных и важных для практики радиосвязи особенностей. В данном диапазоне осуществляется работа радиoliniй связи, различных средств локации, навигации и пеленгации. Существенное влияние на характеристики сигналов оказывают перемещающиеся волновые возмущения (ПИВ), часто наблюдаемые на экспериментальных ионограммах наклонного зондирования (ИНЗ).

В данной работе проводится исследование влияния характеристик ПИВ на форму ИНЗ. Для этого была реализована модель среды распространения с ПИВ волнового типа на базе международной справочной модели ионосферы IRI-2001 [1]. С помощью этой модели и методики трассировки лучей исследовано влияние ПИВ на ИНЗ на трассе Магадан–Иркутск. Выявлено изменение формы ИНЗ по мере продвижения возмущения по трассе распространения и ее зависимость от параметров ПИВ.

На рисунке 1 приведен пример экспериментальной ИНЗ, полученной на трассе Магадан–Иркутск в присутствии ПИВ, с характерным следом на односкачковом моде.

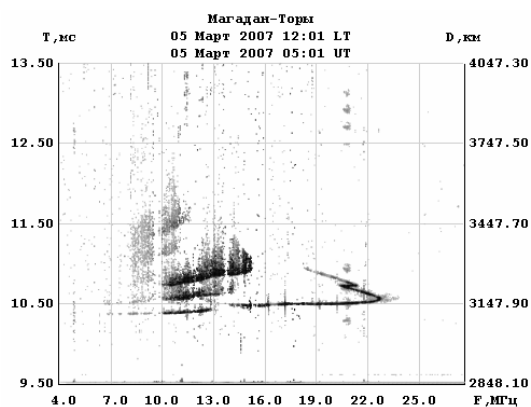


Рис. 1. Экспериментальная ионограмма НЗ, полученная на трассе Магадан–Иркутск

Алгоритм расчета дистанционно-частотных характеристик сигнала (ДЧХ) базируется на приближении геометрической оптики [2] и ранее применялся для моделирования ИНЗ ионосферы [3]. В рамках данного подхода решение траекторной задачи основано на численном интегрировании системы характеристических уравнений для двумерного случая методом Рунге–Кутты 4-го порядка [4]:

$$\begin{aligned} \frac{dr}{d\tau} &= p_r, \quad \frac{d\varphi}{d\tau} = \frac{1}{r} p_\varphi, \\ \frac{dp_r}{d\tau} &= -\frac{f_e}{f_n^2} \frac{\partial f_e}{\partial r} + \frac{1}{r} p_\varphi^2, \\ \frac{dp_\varphi}{d\tau} &= -\frac{1}{r} \left(\frac{f_e}{f_n^2} \frac{\partial f_e}{\partial \varphi} + p_r p_\varphi \right). \end{aligned}$$

Здесь r, φ – координаты в полярной системе координат, связанной с центром Земли, τ – групповой путь (время распространения, умноженное на скорость света), f_e – плазменная частота, f_n – частота передатчика, p_r, p_φ – компоненты направляющего импульса, вектора, по модулю равного показателю преломления и направленного по касательной к траектории в направлении распространения. Аппроксимация характеристик среды распространения проводится с использованием двумерных локальных В-сплайнов второй степени на равномерной сетке значений [5] как для плазменной частоты, так и для ее частных производных. Расчет опорных значений частных производных проводится на основе интерполяции плазменной частоты многочленом Лагранжа

$$\begin{aligned} f'(k) &= \sum_{i=1}^{k-1} \frac{(k-1)!(N-k)!(-1)^{k-i}}{(k-i)(i-1)!(N-i)!} f(i) + \\ &+ f(k) \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N \frac{1}{k-i} + \sum_{i=k+1}^N \frac{(k-1)!(N-k)!(-1)^{i-k-1}}{(i-k)(i-1)!(N-i)!} f(i), \end{aligned}$$

$$k = 1..N.$$

Для исследования эффектов, связанных с ПИВ, была реализована модель среды, использованная в [6], для двумерного случая, когда волновой вектор возмущения лежит в плоскости трассы:

$$N(\varphi, r, t) = N_0(\varphi, r, t) \times \left(1 + A \cos \left(k_r \Delta r + k_\varphi r_0 \Delta \varphi - \frac{2\pi}{T} t + \Phi_0 \right) \right),$$

где N_0 – электронная концентрация в отсутствие ПИВ, A – относительная амплитуда возмущения, T – период ПИВ, Φ_0 – начальная фаза, $k_\varphi = (2\pi/L) \times \cos \alpha$, $k_r = (2\pi/L) \sin \alpha$ – компоненты волнового вектора ПИВ с длиной волны L (угол α задает направление фазовой скорости волнового возмущения), $\Delta\varphi$, Δr – изменение полярных координат относительно точки излучения. Поскольку ПИВ, как правило, имеет цуговую природу для его локализации в пространстве была использована модель, в которой относительная амплитуда A является функцией координат:

$$A(\varphi, r) = A_0 W(\varphi, r);$$

$$W(\varphi, r) = \cos(\pi(r - r_{\text{ПИВ}}) / \Delta r_{\text{ПИВ}}) \times \cos(\pi(\varphi - \varphi_{\text{ПИВ}}) / \Delta \varphi_{\text{ПИВ}}) \quad \text{внутри окна}$$

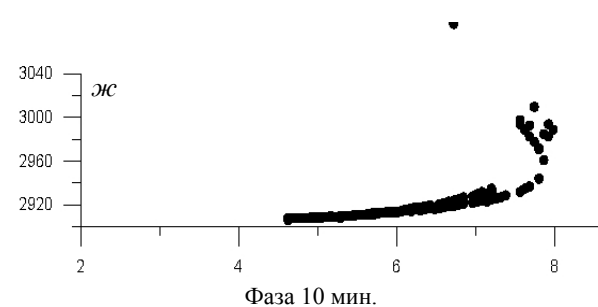
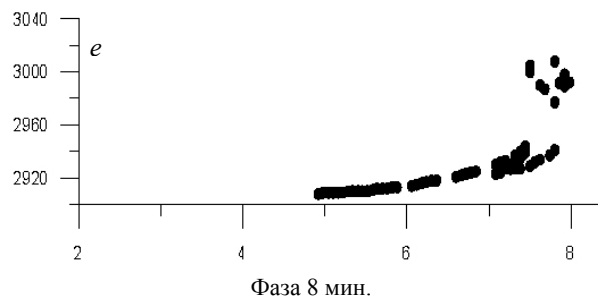
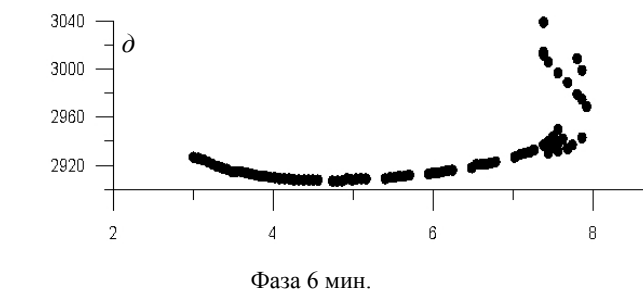
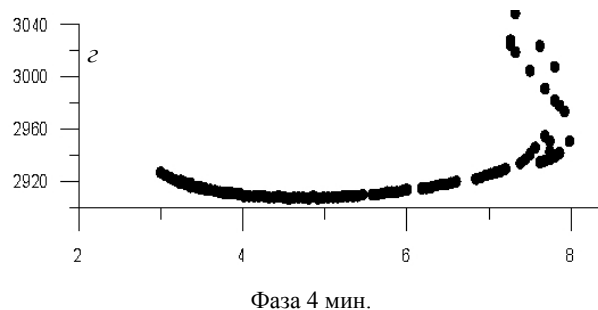
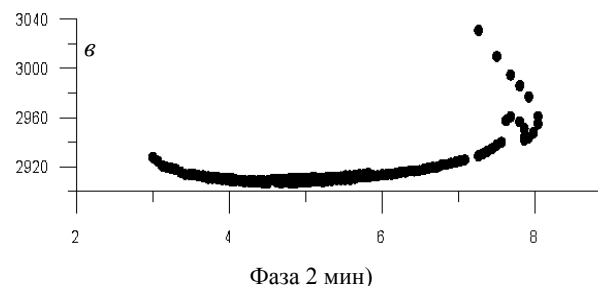
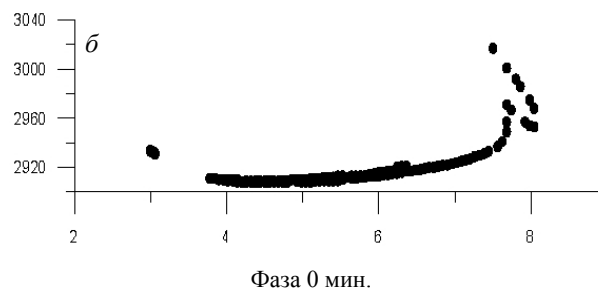
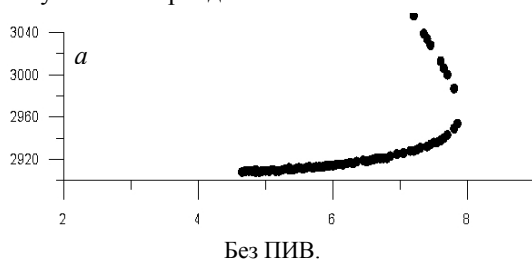
$$W(\varphi, r) = 0 \quad \text{вне окна.}$$

Здесь $r_{\text{ПИВ}}$, $\varphi_{\text{ПИВ}}$, $\Delta r_{\text{ПИВ}}$, $\Delta \varphi_{\text{ПИВ}}$ – координаты центра и размеры окна локализации, т. е.

$$r_{\text{ПИВ}} - \frac{\Delta r_{\text{ПИВ}}}{2} < r < r_{\text{ПИВ}} + \frac{\Delta r_{\text{ПИВ}}}{2},$$

$$\varphi_{\text{ПИВ}} - \frac{\Delta \varphi_{\text{ПИВ}}}{2} < \varphi < \varphi_{\text{ПИВ}} + \frac{\Delta \varphi_{\text{ПИВ}}}{2}.$$

Чтобы получить качественное соответствие модельных и экспериментальных ИНЗ, была проведена серия численных экспериментов (рис. 2, а – и). В качестве фонового распределения электронной концентрации был использован профиль, рассчитанный по модели IRI-2001 для трассы Магадан–Иркутск. Параметры ПИВ были выбраны такими же, как и в [6], а именно: длина волны 150 км, амплитуда 20 %, угол наклона волнового вектора 60°, период 15 мин. Время изменялось с шагом 1 мин. По мере продвижения возмущения по трассе наблюдался сход возмущения на ДЧХ в область меньших задержек, а также при наличии ПИВ наблюдалось небольшое увеличение МПЧ, что качественно соответствует экспериментальным данным. За один период возмущение прошло от верхнего луча к нижнему, причём на верхнем луче оно присутствовало большую часть периода.



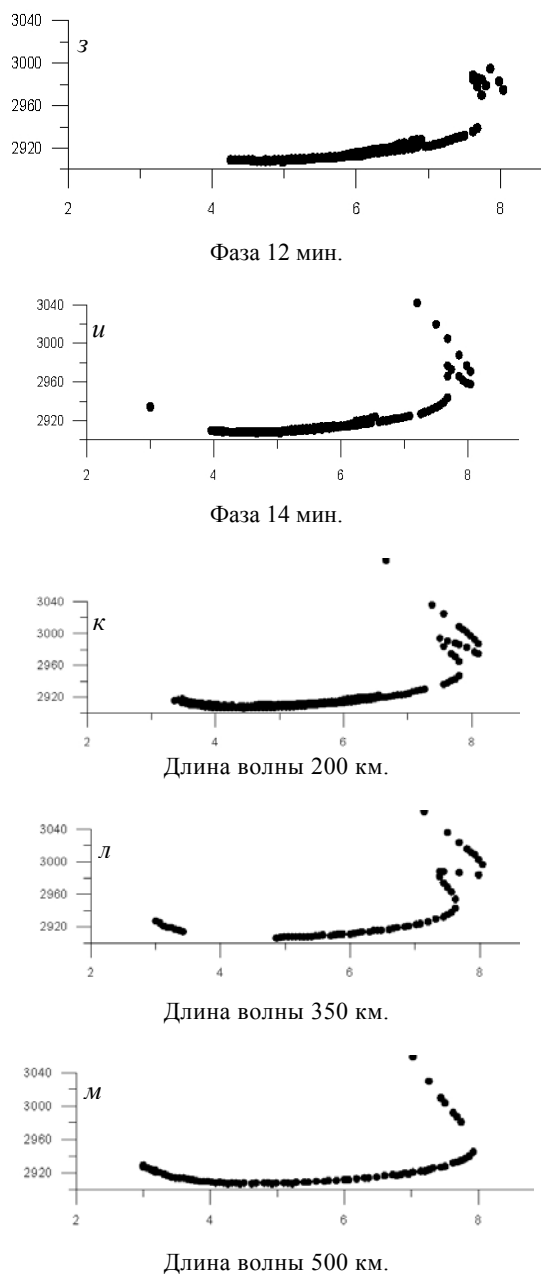


Рис. 2. Результаты моделирования

При уменьшении угла наклона волнового вектора относительно горизонта влияние ПИВ на форму ИНЗ уменьшается и при -30° практически прекращается, однако при увеличении амплитуды до 35 % след ПИВ становится существенно отчётливее, что, в общем-то, очевидно. Также при уменьшении угла наклона след становится более пологим. Таким образом, угол наклона в -30° является пороговым при данных параметрах ПИВ.

Как видно из рисунков 2, к–м, при увеличении пространственного периода проявление ПИВ на ионограмме значительно ослабевает и при длине волны 500 км прекращается вовсе.

Поскольку ПИВ имеет, как правило, цуговую природу, была проведена серия численных экспериментов со следующими параметрами окна локализации: размер по дальности 300 км, размер по высоте 70 км, для различных положений волновых пакетов. На рисунке 3 изображены траектории

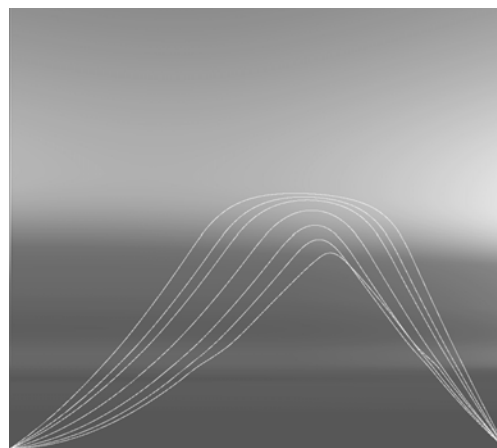


Рис. 3. Траектории лучей для различных частот в отсутствие ПИВ.

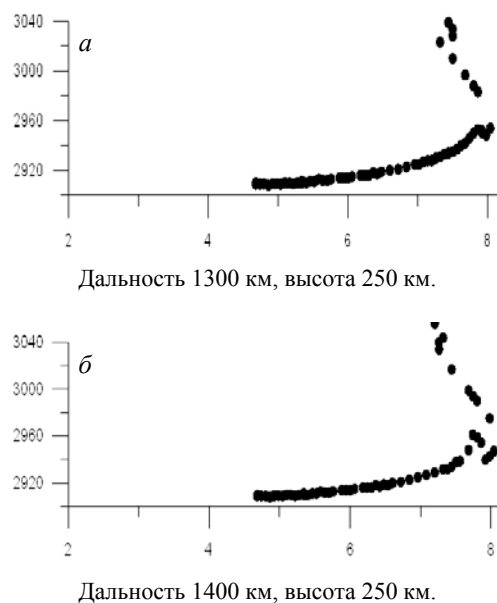


Рис. 4. Результаты моделирования

для различных частот в отсутствие ПИВ. Из рис. 4, а, б видно, что при прохождении волнового пакета след ПИВ на верхнем луче ослабевает, а на нижнем усиливается.

Волновой пакет оказывает влияние лишь на те траектории, которые его пересекают, причем влияние тем сильнее, чем ближе волновой пакет к точке наибольшего перегиба траектории. На экспериментальных ИНЗ часто наблюдается картина, когда след ПИВ, возникая на верхнем луче, исчезает, не доходя до нижнего. Такую картину можно интерпретировать следующим образом: волновой пакет проходит в области верхних траекторий, не затрагивая нижние.

Выводы

Параметры, близкие рекомендованным в работе [6], являются оптимальными для появления следа ПИВ на ионограмме. След на ионограмме, обусловленный ПИВ, проходит от верхнего луча к нижнему один раз за временной период, причем большую часть периода он наблюдается на верхнем луче. Три остальных ключевых параметра – амплитуда, длина

волны и угол наклона волнового вектора к горизонту – однозначно определить не представляется возможным. Вероятно, информацию о них можно получить с одновременно наблюдаемых ИНЗ для трасс, пересекающихся в средней точке. Ограниченный в пространстве волновой пакет оказывает влияние лишь на те траектории, которые его пересекают, причем влияние тем сильнее, чем ближе волновой пакет к точке наибольшего перегиба траектории.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 05-07-90212, № 05-05-64634).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bilitza D. International reference ionosphere // *Radio Sci.* 2001. V. 36, N 2. P. 262–275.
2. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука 1982. 368 с.
3. Голыгин В.А., Михайлов Я.С., Куркин В.И., Сажин

В.И. Численное моделирование ионограмм наклонного зондирования ионосферы при наличии распространения в ионосферных волновых каналах // Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды VI сессии молодых ученых «Волновые процессы в проблеме космической погоды». Иркутск, 2003. С. 79–81.

4. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: Наука, 1987. 598 с.

5. Коноплин В.Н., Орлов А.И. Приближение данных локальными сплайнами второй степени // Исследования по геомагнетизму, астрономии и физике Солнца. М.: Наука, 1981. Вып. 57. С. 101–104.

6. Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградов В.Г. Наклонное зондирование и моделирование ионосферного коротковолнового канала // *Известия вузов. Радиофизика.* 2005. Т. XLVIII, № 6. С. 455–470.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск