

УДК 550.338.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПО ИОНОГРАММАМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ U-ОБРАЗНЫМИ ТРЕКАМИ

© 2021 г. О. А. Ларюнин*

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

**e-mail: laroleg@iszf.irk.ru*

Поступила в редакцию 25.02.2021 г.

После доработки 18.05.2021 г.

Принята к публикации 27.05.2021 г.

Рассмотрен случай, когда в результате перемещения дополнительного U-образного трека на ионограммах вертикального зондирования фиксируется повышенная критическая частота. Это соответствует появлению над точкой зондирования области с повышенной электронной концентрацией. Представлена методика исследования характеристик перемещающихся ионосферных возмущений по ионограммам в рамках двумерной модели возмущения. Исследованы изменения формы дополнительного трека ионограммы, к которым приводит варьирование параметров возмущения. Показаны возможности определения таких характеристик перемещающихся ионосферных возмущений, как интенсивность, масштаб локализации, горизонтальная скорость дрейфа.

DOI: 10.31857/S0016794021060109

1. ВВЕДЕНИЕ

На ионограммах вертикального и слабонаклонного зондирования можно часто наблюдать дополнительный U-образный трек, свидетельствующий о наличии перемещающегося ионосферного возмущения (ПИВ).

Еще в середине прошлого века было установлено [Munro and Heisler, 1956], что появление серпообразных особенностей на ионограммах связано с прохождением ПИВ, которые приводят к образованию горизонтальных градиентов электронной концентрации ионосферы и, соответственно, к невертикальным отражениям лучей при радиозондировании.

Дополнительные треки на ионограммах вертикального зондирования разнообразны как по форме, так и по динамическим проявлениям [Akchurin et al., 2011; Moskaleva and Zaalov, 2013; Lou et al., 2020; Zaalov and Moskaleva, 2020]. Помимо наиболее распространенных U-образных структур (серпов) можно встретить треки с более сложными формами, которые с трудом поддаются имитационному моделированию.

Моделирование серпов в условиях неслоистой среды было начато во второй половине XX века [Munro and Heisler, 1956; Lobb and Titheridge, 1977; Cooper and Cummack, 1986] и было продолжено в последующих работах [James and MacDougall,

1997; Cervera and Harris, 2014]. Тем не менее, корректное моделирование, например, переходного процесса слияния простого U-образного серпа с основным треком ионограммы до сих пор остается трудной задачей [Lou et al., 2020]. Тем более открытым остается вопрос об обратной задаче восстановления горизонтально-неоднородной структуры ионосферы по ионограммам с дополнительными треками.

В работах [Emmons et al., 2020; Ratovsky et al., 2008] представлены методики исследования динамики ПИВ по временным вариациям действующих высот на ионограммах. Истинные высоты там восстанавливаются из ионограмм методом Хуанга–Райниша в предположении плоско-слоистой среды. Указанные методики представляются эффективными в случаях, когда ПИВ не приводят к ярко выраженным боковым отражениям. Иная ситуация имеет место при ПИВ с большими амплитудами, которые приводят к значительным горизонтальным градиентам электронной концентрации. В этом случае на ионограммах могут возникать характерные U-образные треки, для изучения которых уже становится необходимым траекторный синтез.

Таким образом, целью настоящей работы является модельное описание дополнительных U-образных треков на ионограммах вертикального

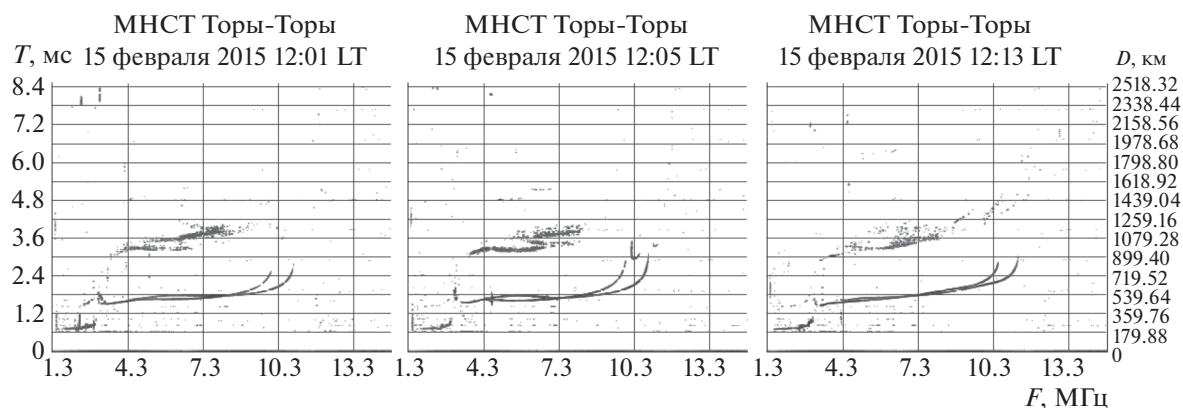


Рис. 1. Ионограммы вертикального зондирования перед, во время и после появления серпа.

зондирования, реконструкция ионосферных возмущений с помощью имитационного моделирования, а также исследование динамики перемещающихся ионосферных возмущений по последовательности ионограмм.

Представленные в работе ионограммы были получены в ежеминутном режиме в п. Торы ($51^{\circ}48' N$, $103^{\circ}5' E$) в 100 км от Иркутска [Berngardt et al., 2017].

2. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Траекторный синтез ионограмм выполнялся на основе алгоритма двумерной пристрелки лучей в приближении геометрической оптики. Так, для каждой заданной рабочей частоты алгоритм позволяет рассчитывать набор траекторий, соответствующих углам излучения в выбранном интервале (от -1° до 45°) с определенным шагом (0.1°). Отметим, что отрицательные углы здесь не дают возвратных траекторий и не представляют интереса, однако важно, чтобы вертикальная траектория (0°) попала внутрь интервала. Полученный набор траекторий позволяет, используя сплайн-интерполяцию, построить дальностно-угловую характеристику $D(\varphi)$. Далее численно решается уравнение $D(\varphi) = 0$: при вертикальном зондировании дальность трассы равна нулю. Наконец, для найденного угла излучения (или углов – в случае многолучевости) синтезируется траектория и фиксируется групповая задержка, которая впоследствии отображается в виде точки на ионограмме. Описанная процедура повторяется для других рабочих частот, при этом шаг по частоте составляет 0.025 МГц.

Рассмотрим часто наблюдаемый на ионограммах случай, когда в результате прохождения U-образной структуры устанавливается повышенная критическая частота. Такого рода событие проиллюстрировано на рисунках 1 и 2. Длительность события, т.е. временной интервал между

спокойными ионограммами до и после появления серпа, составляет 12 мин, что подчеркивает недостаточность типичной для ионозондов скважности наблюдений в 15 мин для исследования динамических процессов в ионосфере. Так как на ионограммах устанавливается повышенная критическая частота, то будет обоснованным предположить появление области с повышенной электронной концентрацией над точкой зондирования. Траектории, образующие серп на ионограмме, формируются в переходный период за счет боковых (невертикальных) отражений на горизонтальных градиентах электронной концентрации.

Как показывает моделирование, плавность перехода от фоновой к повышенной электронной концентрации (т.е. величина горизонтального градиента) влияет на вид траектории луча и, следовательно, на групповой путь. Другими словами, форма возмущения задает форму серпа на ионограмме. Возникающая в этой связи обратная задача восстановления параметров возмущения будет решена путем многократного решения соответствующей прямой задачи с последующим фитированием.

Модель возмущения вида (1) представляется в данном контексте вполне адекватной, хотя данный выбор не носит принципиального характера.

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

Здесь x и z соответственно – горизонтальная и вертикальная координаты; $f_{p0}(z)$ – фоновая плазменная частота; δ – интенсивность возмущения; x_0 – центр возмущения; b – масштаб возмущения. Отметим, что электронная концентрация

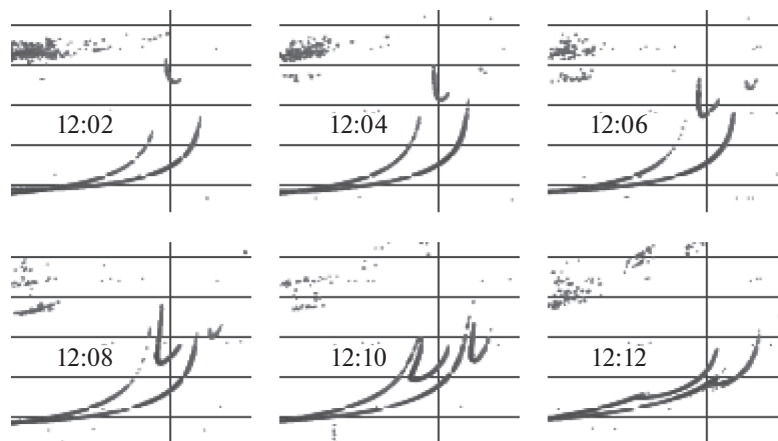


Рис. 2. Эволюция серпа на ионограммах.

N и плазменная частота связаны соотношением $f_p^2 = \frac{Ne^2}{4\pi^2 \epsilon_0 m}$, где e и m – заряд и масса электрона; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная.

3. ПОДБОР ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

Интенсивность возмущения $\delta = \frac{f_{cl} - f_{c0}}{f_{c0}}$ определяется приращением критической частоты в результате прохождения серповидной структуры и составляет в данном случае 7%, $f_{cl} = 1.07f_{c0}$. При расчете за последнюю спокойную ионограмму перед событием взят момент времени 12:01 LT. По этой ионограмме методом Хуанга–Райниша [Reinisch and Huang, 1983] определен фоновый профиль $f_{p0}(z)$ (рис. 3).

Первая спокойная ионограмма после события наблюдается в 12:13 LT. 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. Действительно, приближение возмущения ведет к “укорачиванию” боковых траекторий и соответственно к уменьшению группового пути. Наконец, масштаб b в выражении (1) является фактором формы возмущения и варьирует горизонтальный градиент электронной концентрации (рис. 4), задавая плавность перехода от фоновых значений к возмущенному состоянию. Фактически, дальнейшая задача сводится к поиску значения b , наиболее точно отвечающему экспериментальной ионограмме. В качестве эталонной на данном этапе выбрана серповидная структура в 12:05 LT.

Если первым критерием соответствия модели и эксперимента служит совпадение правой

асимптоты серпа – фактической критической частоты на возмущенной ионограмме, то за второй критерий целесообразно взять совпадение точек минимума серпа. Соответствующее фитирование представляет собой наиболее затратную часть с точки зрения компьютерного времени. Данная процедура сводится к перебору параметров b и x_0 с фиксацией ближайших к экспериментальному положений точек минимума и последующей интерполяцией.

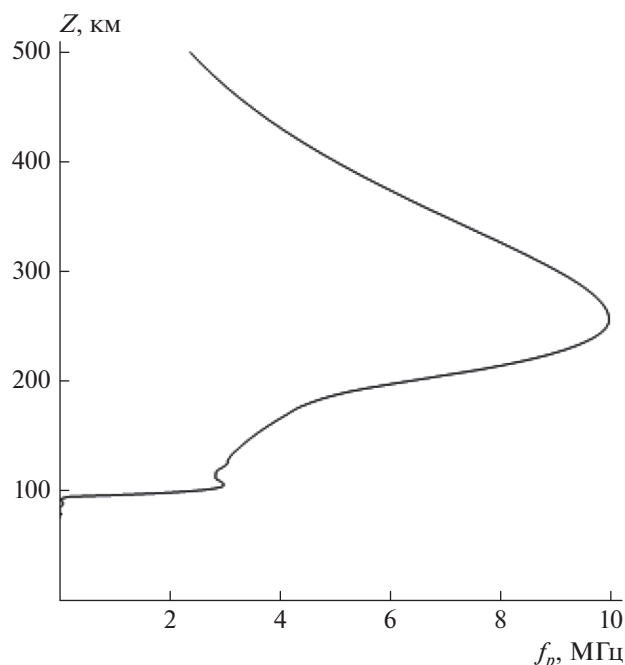


Рис. 3. Фоновый высотный профиль электронной концентрации.

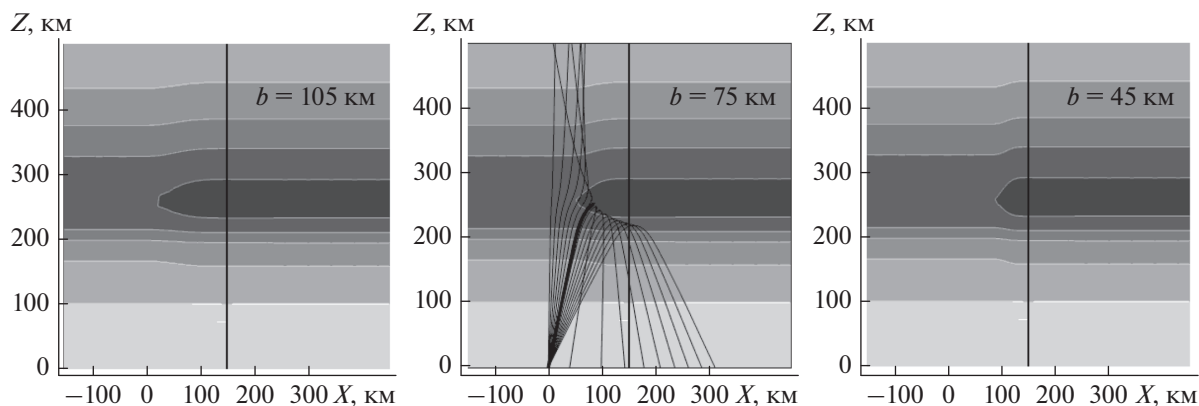


Рис. 4. Горизонтально-неоднородная структура ионосферы и лучевые траектории при $f = 10.3$ МГц. $b = 105$ км (левая панель), $b = 75$ км (средняя панель) и $b = 45$ км (правая панель). Жирная кривая на средней панели соответствует возвратному лучу. Вертикальная линия соответствует центру возмущения, $x_0 = 150$ км. При $x \geq x_0$ среда слоистая.

На рисунке 5 показан случай $b = 75$ км: синтезированный серп сползает вниз по мере уменьшения x_0 . Точка (10.3 МГц, 439 км) соответствует эксперименту и является искомой при фитировании.

Рисунок 6 представляет собой аналог рис. 5в увеличенном масштабе для $b = 90$ км и $b = 60$ км соответственно.

Процедура фитирования проиллюстрирована на рисунках 5, 6, 7 и заключается в следующем. Для каждого значения b варьируется параметр x_0 , т.е. заданное возмущение приближается к точке наблюдения. При этом соответствующий серп сползает вниз, и его минимум в какой-то момент проходит уровень $h' = 439$ км. Фиксируется частота, на которой произошло пересечение данного уровня. Последующее варьирование масштаба b

позволяет найти пересечение уровня 439 км, максимально близкое к 10.3 МГц.

Можно видеть на рис. 6, что в первом случае (левая панель) пересечение уровня $h' = 439$ км происходит слева, при $f = 10.24$ МГц, тогда как во втором случае (правая панель) – справа, при $f = 10.34$ МГц. Далее аналогичным образом определяются точки пересечения для других значений b (рис. 7а). Можно видеть, что интерполяция прогнозирует наилучшее совпадение при $b = 70$ км, что и подтверждает рис. 7б.

Следует отметить визуальное расхождение данных модели и эксперимента в области левой асимптоты серпа. Очевидно, это связано с погрешностью модели (1). Вероятно, введение дополнительных параметров в модель (например, наклон возмущения или его локализация по высоте) приведет к лучшему соответствию. Однако соответствующее увеличение времени расчета в практических целях не представляется целесообразным.

4. ОЦЕНКА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ВОЗМУЩЕНИЯ

Представляет интерес исследование динамики ПИВ по последовательности экспериментальных ионограмм. Сползание серпа на ионограммах связано с движением ПИВ, и чем быстрее движется серп, тем быстрее перемещается соответствующее возмущение. Не составляет труда по набору ионограмм определить горизонтальную скорость возмущения. Для возмущения вида (1), где параметры $\delta = 7\%$ и $b = 70$ км уже найдены в ходе фитирования, будем варьировать значение x_0 . Возмущение при этом будет удаляться (с ростом x_0) или приближаться (по мере уменьшения x_0) к точке излучения, а синтезированный серп соответственно подниматься или опускаться подобно

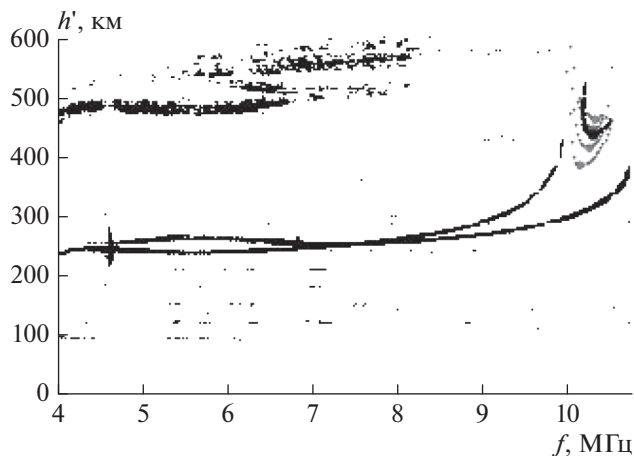


Рис. 5. Серия синтезированных серпов, наложенных на экспериментальную ионограмму 12:05 LT, для $b = 75$ км. Жирными точками показаны минимумы серпов.

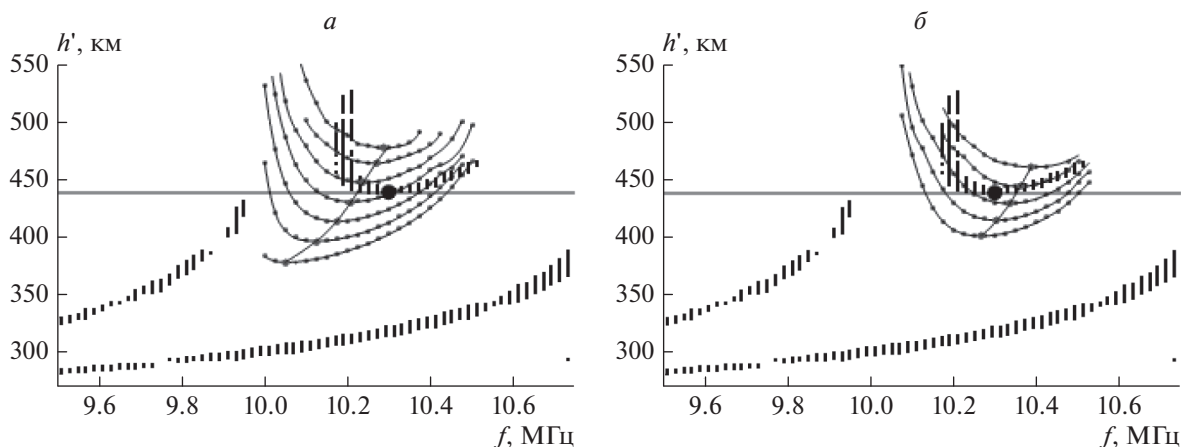


Рис. 6. Увеличенные фрагменты синтезированных ионограмм, наложенных на экспериментальную 12:05 ЛТ. (а) $b = 90$ км; (б) $b = 60$ км. Горизонтальная кривая задает уровень 439 км, соответствующий минимуму эталонного экспериментального серпа. В ходе фитирования мы добиваемся того, чтобы кривая, которую описывают минимумы синтезированного серпа, прошла через минимум экспериментального серпа.

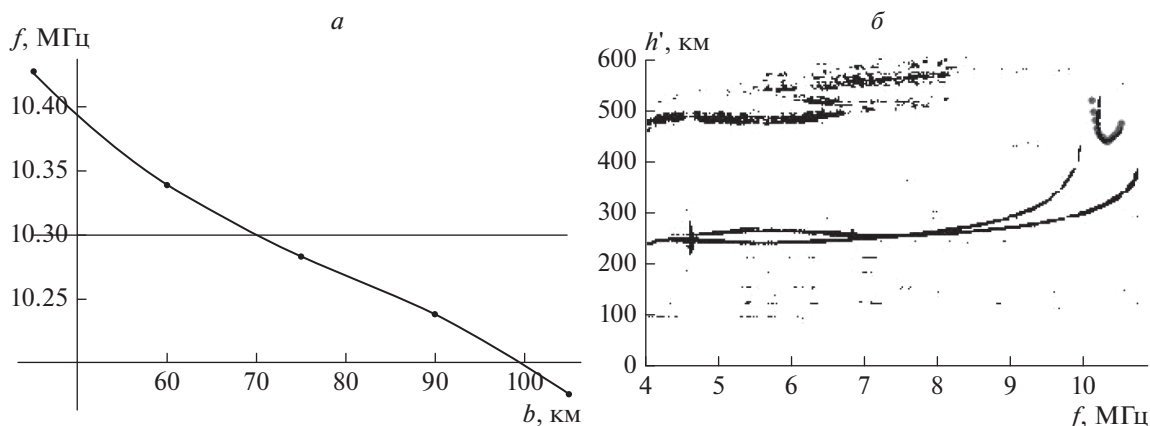


Рис. 7. При значении $b = 70$ км (а) – интерполяция прогнозирует прохождение синтезированного серпа через искомую точку (10.3 МГц, 439 км) на ионограмме, что подтверждает панель (б).

изображенному на рис. 4. Будем фиксировать действующую высоту h' , соответствующую точке минимума каждого синтезированного серпа, получая таким образом зависимость $h'_{\min}(x_0)$ (см. рис. 8, кружки). С другой стороны, временная зависимость $h'_{\min}(t)$ устанавливается экспериментально: на рис. 8 она показана треугольниками.

Верхняя и нижняя горизонтальные оси на рис. 8 масштабированы так, чтобы результаты линейной регрессии для экспериментальной и модельной зависимостей отображались на одной кривой. Так, например, видно, что серп на экспериментальной ионограмме $t_1 = 12:08$ соответствует локализации возмущения $x_{01} = 135.5$ км, а момент времени $t_2 = 12:04$ отвечает значению $x_{02} = 158$ км. Тогда горизонтальная скорость пе-

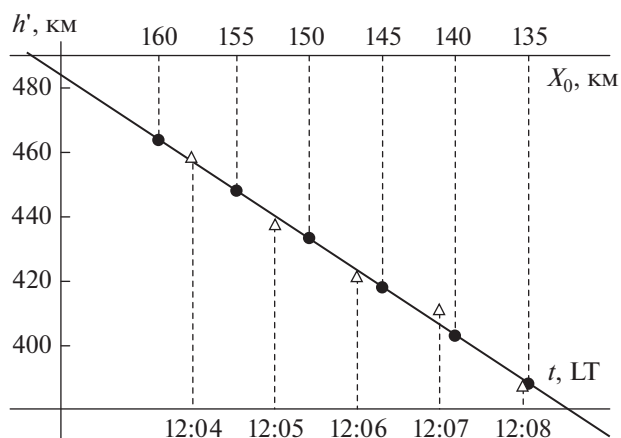


Рис. 8. Определение горизонтальной скорости перемещения возмущения.

ремещения возмущения по направлению к точке

$$\text{наблюдения } V_x = \frac{x_{02} - x_{01}}{|t_2 - t_1|} \approx 94 \text{ м/с.}$$

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная методика позволяет восстанавливать электронную концентрацию в горизонтально-неоднородной ионосфере (двумерный случай) по ряду экспериментальных ионограмм вертикального зондирования, содержащих дополнительные серповидные треки на основе траекторного синтеза с последующим фитированием.

Использованная гауссоподобная модель перехода от фоновой ионосферы к возмущенной показала свою состоятельность для воспроизведения наблюдаемых серпов при моделировании. В качестве примера, для выбранного набора ионограмм были определены такие характеристики возмущения, как интенсивность, пространственный масштаб, горизонтальная скорость перемещения.

При рассмотрении динамики возмущения оказалось, что экспериментальные ионограммы демонстрируют квазилинейное нисхождение серпа в рассматриваемом временном интервале. В то же время линейная зависимость положения серпа на ионограмме от горизонтальной координаты возмущения имеет место и при моделировании. В этой связи оказывается нетрудным определить горизонтальную скорость перемещения ионосферного возмущения, добиваясь совпадения экспериментальных и синтезированных серпов путем соответствующего масштабирования временной и координатной осей.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Минобрнауки России), субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278.

БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Ангара” (<http://ckp-uf.ru/ckp/3056/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Akchurin A.D., Bochkarev V.V., Ildiryakov V.R., Usupov K.M. TID selection and research of its characteristics on ionograms / Proc. 30th URSI General Assembly and Scientific Symposium. Istanbul, Turkey, 13–20 August 2011. GP1.23. 2011.
- Berngardt O.I., Perevalova N.P., Podlesnyi A.V., Kurkin V.I., Zhrebisov G.A. Vertical midscale ionospheric disturbances caused by surface seismic waves based on Irkutsk chirp ionosonde data in 2011–2016 // J. Geophys. Res. Space. V. 122. № 4. P. 4736–4754. 2017.
- Cervera M.A., Harris T.J. Modeling ionospheric disturbance features in quasi-vertically incident ionograms using 3-D magnetoionic ray tracing and atmospheric gravity waves // J. Geophys. Res. Space. V. 119. № 1. P. 431–440. 2014.
- Cooper J., Cumack C.H. The analysis of travelling ionospheric disturbance with nonlinear ionospheric response // J. Atmos. Solar Terr. Phys. V. 48. № 1. P. 61–64. 1986.
- Emmons D.J., Dao E.V., Knippling K.K., McNamara L.F., Nava O.A., Obenberger K.S., Colman J.J. Estimating horizontal phase speeds of a traveling ionospheric disturbance from digisonde single site vertical ionograms // Radio Sci. V. 55. № 8. e2020RS007089. 2020.
- James H.G., MacDougall J.W. Signatures of polar cap patches in ground ionosonde data // Radio Sci. V. 32. № 2. P. 497–513. 1997.
- Lobb R.J., Titheridge J.E. The effects of travelling ionospheric disturbances on ionograms // J. Atmos. Terr. Phys. V. 39. № 2. P. 129–134. 1977.
- Lou P., Wei N., Guo L., Feng J., Li X., Yang L. Numerical study of traveling ionosphere disturbances with vertical incidence data // Adv. Space Res. V. 65. № 4. P. 1306–1320. 2020.
- Moskaleva E.V., Zaalov N.Y. Signature of polar cap inhomogeneities in vertical sounding data // Radio Sci. V. 48. № 5. P. 547–563. 2013.
- Munro G.H., Heisler L.H. Cusp type anomalies in variable frequency ionospheric records // Aust. J. Phys. V. 9. P. 343–357. 1956.
- Ratovsky K.G., Medvedev A.V., Tolstikov M.V., Kushnarev D.S. Case studies of height structure of TID propagation characteristics using cross-correlation analysis of incoherent scatter radar and DPS-4 ionosonde data // Adv. Space Res. V. 41. № 9. P. 1454–1458. 2008.
- Reinisch B.W., Huang X. Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms. 3. Processing of bottomside ionograms // Radio Sci. V. 18. № 3. P. 477–492. 1983.
- Zaalov N.Y., Moskaleva E.V. Oblique and vertical incidence ionogram simulations with the presence of Es layer // Adv. Space Res. V. 66. № 7. P. 1713–1723. 2020.