

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ НЕСКОЛЬКИХ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ

А.В. Медведев, К.Г. Ратовский, М.В. Толстикова

### INVESTIGATION OF TRAVELING IONOSPHERIC DISTURBANCES ON THE BASE OF SIMULTANEOUS MEASUREMENTS MADE WITH SEVERAL RADIOPHYSICS TOOLS

A.V. Medvedev, K.G. Ratovsky, M.V. Tolstikov

Работа посвящена методике определения параметров перемещающихся ионосферных возмущений с помощью корреляционного анализа данных радара некогерентного рассеяния и ионозонда. В работе описаны алгоритмы выделения возмущений, а также определения их скорости и направления перемещения. Приведены оценки возможностей метода.

#### Введение

Наблюдения за перемещающимися ионосферными возмущениями (ПИБ) необходимы для изучения связей между ионосферой и плазмосферой, ионосферой и нейтральной атмосферой, а также различными областями ионосферы. Основным источником информации о параметрах ионосферы остаются радиофизические инструменты, такие как ионозонды вертикального и наклонного зондирования, радары некогерентного рассеяния (НР), системы GPS и т.д. Определение скорости и направления движения ПИБ по данным только одного из перечисленных инструментов часто бывает затруднено или невозможно. Комплексное использование набора разных, пространственно разнесенных инструментов открывает дополнительные возможности. В работе рассматривается методика определения параметров ПИБ с помощью корреляционного анализа данных радара некогерентного рассеяния и ионозонда вертикального зондирования ИСЗФ СО РАН.

#### Описание инструментов

Ионозонд DPS-4 расположен непосредственно в Иркутске. Радар НР расположен в 98 км к северо-западу от Иркутска. Ионозонд DPS-4 [1] позволяет измерять электронную концентрацию в диапазоне высот от ~100 км до высоты максимума электронной концентрации с экстраполяцией выше высоты максимума по методике Хуанга [2]. Потенциальное временное разрешение ионозонда составляет порядка 1 мин, однако в работе используются данные, полученные в штатном режиме, т.е. через 15 мин.

Иркутский радар НР [3] обеспечивает измерение электронной концентрации в диапазоне высот от ~200 до ~700 км. Временной интервал между измерениями на радаре НР составляет от 2 до 10 мин. Ось антенны радара повернута на 7° от меридиана и наклонена на 10° к западу. Наклон диаграммы направленности антенны можно менять в зависимости от частоты на 30° от зенита радара в обоих направлениях. В работе используются данные, полученные на частоте 158 МГц, которая соответствует наклону луча радара на 16° от зенита в азимутальном направлении 212° от севера по часовой стрелке.

#### Метод выделения возмущений

Ионозонд измеряет электронную концентрацию как функцию двух переменных  $N_D(z, t)$ , где  $z$  – высо-

та над поверхностью Земли в Иркутске,  $t$  – время. Результатом измерений радара НР является функция  $N_R(R, t)$ , где  $R$  – наклонная дальность вдоль луча,  $t$  – время. Как функции времени  $N_D(z, t)$  и  $N_R(R, t)$  могут быть с помощью полосового фильтра условно разделены на медленные  $\tilde{N}_D(z, t)$ ,  $\tilde{N}_R(R, t)$  и быстрые  $\Delta N_D(z, t)$ ,  $\Delta N_R(R, t)$  составляющие:

$$N_D(z, t) = \tilde{N}_D(z, t) + \Delta N_D(z, t). \quad (1)$$

$$N_R(R, t) = \tilde{N}_R(R, t) + \Delta N_R(R, t). \quad (2)$$

В дальнейшем будем считать, что функции  $\tilde{N}_D(z, t)$  и  $\tilde{N}_R(R, t)$  описывают фоновые вариации электронной концентрации, а  $\Delta N_D(z, t)$  и  $\Delta N_R(R, t)$  соответствуют возмущениям.

#### Алгоритм определения параметров движения по данным радара и ионозонда

Выберем декартову систему с началом координат в точке расположения радарной антенны, осью  $Z$ , направленной по радиусу Земли вверх, и осью  $X$ , направленной вдоль линии, соединяющей радар и ионозонд. Тогда, согласно принятой модели, в выбранной системе координат возмущения электронной концентрации, измеренные на ионозонде  $\Delta N_D(z, t)$  и радаре  $\Delta N_R(R, t)$ , имеют следующий вид:

$$\Delta N_D(z, t) = \Delta N_0(t - \tau_D(z)), \quad \tau_D(z) = (e_z z + e_x x) / V,$$

$$\Delta N_R(R, t) = \Delta N_0(t - \tau_R(R)), \quad \tau_R(R) = (e_z \alpha_z + e_x \alpha_x + e_y \alpha_y) R / V,$$

где  $t$  – время;  $z$  – высота над ионозондом;  $R$  – дальность вдоль луча радара от места расположения его антенны;  $x$  – расстояние от радара до ионозонда;  $\alpha_x = \sin \vartheta \cos \psi$ ;  $\alpha_y = \sin \vartheta \sin \psi$ ;  $\alpha_z = \cos \vartheta$ ;  $\vartheta$  – угол наклона луча радара от зенита;  $\psi$  – азимут проекции луча радара на Землю, отчитанный от оси  $X$ .

Измеряемыми величинами, позволяющими определить параметры возмущения, являются относительные задержки между возмущениями, измеренными на ионозонде на различных высотах  $\Delta \tau_D(z_1, z_2) = \tau_D(z_2) - \tau_D(z_1)$ , задержки между возмущениями, измеренными на радаре на различных дальностях  $\Delta \tau_R(R_1, R_2) = \tau_R(R_2) - \tau_R(R_1)$ , и задержка между возмущениями, измеренными на ионозонде и радаре  $\Delta \tau_{RD}(z, R) = \tau_R(R) - \tau_D(z)$ .

Для удобства введем вектор  $\vec{q} = \vec{e}/V$ , компоненты которого  $q_x = \sin\theta\cos\varphi/V$ ,  $q_y = \sin\theta\sin\varphi/V$ ,  $q_z = \cos\theta/V$  однозначно определяют искомые параметры движения. Компоненты вектора  $\vec{q}$  можно найти решением системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} q_z = \Delta\tau_D(z_1, z_2)/(z_2 - z_1), \\ q_z\alpha_z + q_x\alpha_x + q_y\alpha_y = \Delta\tau_R(R_1, R_2)/(R_2 - R_1), \\ q_z(R\alpha_z - z) + q_x(R\alpha_x - x) + q_yR\alpha_y = \Delta\tau_{RD}(z, R). \end{cases}$$

Система имеет однозначное решение, если луч радара и вертикальная ось над ионозондом не лежат в одной плоскости, т.е.  $x \neq 0$ ,  $y \neq 0$ ,  $z \neq 0$ .

Для получения  $\Delta\tau_D(z_1, z_2)$  достаточно измерений на двух высотах. Измерения на сетке высот образуют избыточную информацию, которая может быть использована для более точного измерения  $\Delta\tau_D(z_1, z_2)$ .

### Результаты измерений

На рис. 1 показана высотно-временная динамика неоднородностей концентрации электронов, измеренная на радаре НР (а) и дигизонде (б) 2 февраля 2003 г. По горизонтальной оси отложено время в UT, по вертикальной – высота в километрах. Хорошо виден волновой, квазигармонический характер возмущений. Однако форма возмущений может значительно изменяться с высотой. На длительном интервале наблюдения и во всем диапазоне высот считать фронт волны плоским нельзя, так как углы наклона волнового фронта на различных высотах и в различные моменты времени существенно различаются. Кроме того, в момент прохода терминатора (12:30 UT) заметно меняются периоды колебаний. В каждый момент времени экспериментальные данные в основных деталях адекватно описываются интерференцией двух волн: «нижней», амплитуда которой падает с ростом высоты и «верхней», амплитуда которой с ростом высоты увеличивается. На рис. 1, б показан результат численного моделирования эксперимента в приближении двух волн. С 01:00 UT до 12:30 UT периоды интерферирующих волн были заданы 1.43 и 1.4 ч, с 12:00 UT до 24:00 UT – 1.89 и 1.73 ч.

Анализ пространственно-временной картины возмущений показывает, что модель, основанная на неизменности формы возмущения на всем временном и высотном интервале, неприменима, поэтому при определении характеристик движения сутки разделились на двухчасовые интервалы и выделялось три диапазона высот, внутри которых фронт волны можно было считать локально плоским. Результаты расчетов параметров перемещения представлены на рис. 2.

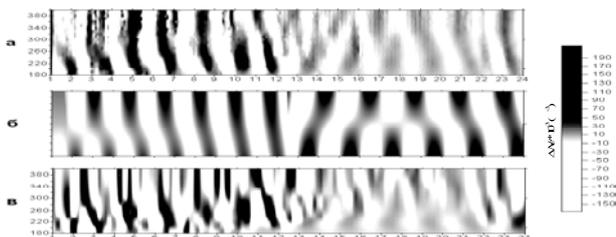


Рис. 1. Возмущения Ne на радаре (а), ионозонде (б) и модель (б).

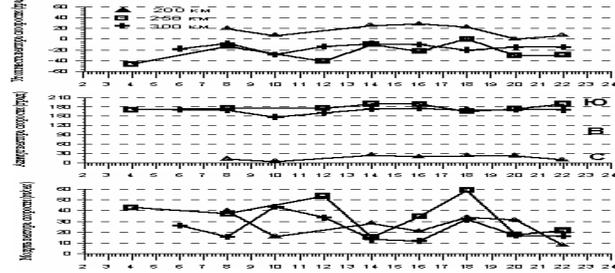


Рис. 2. Результаты расчетов параметров перемещения возмущений.

В результате расчетов были определены два направления распространения возмущений – северное и южное. Возмущения, распространяющиеся в северном направлении, преобладают на высотах, меньших 240 км, и распространяются снизу вверх. Возмущения, распространяющиеся в южном направлении, преобладают на высотах, больших 240 км, и распространяются сверху вниз.

Нами также были проведены расчеты с помощью этого метода для необычно сильного возмущения, происшедшего 10 ноября 2004 г. в районе максимума слоя F2. Возмущение выделялось с помощью фильтра с полосой от 3 до 8 ч. На рис. 3 представлено возмущение на высотах 300 (а), 360 (б) и 380 (в) км.

На рис. 4 представлен азимут направления распространения возмущения, а на рис. 5 – скорость распространения возмущения на тех же высотах.

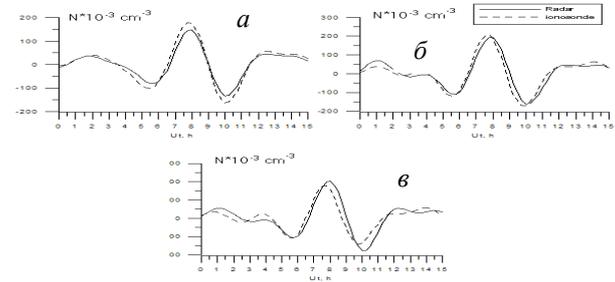


Рис. 3.

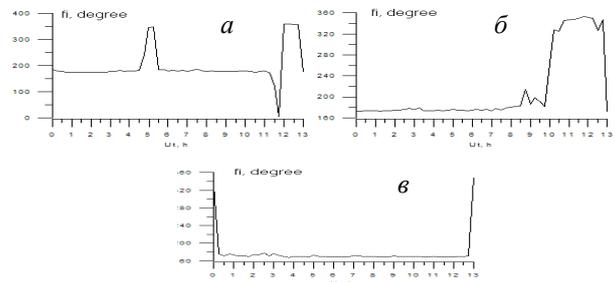
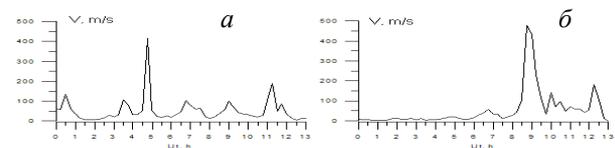


Рис. 4.



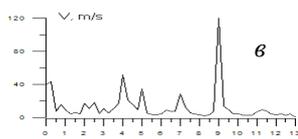


Рис. 5.

### Заключение

Метод определения характеристик ПИВ, основанный на использовании данных ионозонда и радара HP, показал свою работоспособность даже в приближении одной плоской волны при разбиении экспериментальных данных на пространственно-временные интервалы. Перспективой развития метода является учет в модели возмущения интерференции волн от различных источников.

Настоящая работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 03-05-64627 и № 03-05-64527) и в рамках гранта НШ-272.2003.5 государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reinisch B.W., Haines D.M., Bibl K. et al. Ionospheric sounding support of OTH radar // Radio Sci. 1997. V. 32, N 4. P. 1681–1694.
2. Huang X., Reinisch B.W. Vertical electron content from ionograms in real time // Radio Sci. 2001. V. 36, N 2. P. 335–342.
3. Жеребцов Г.А., Заворин А.В., Медведев А.В. и др. Иркутский радар некогерентного рассеяния // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47, № 11. С. 1–7.

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск*