

УДК 550.388.2

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ТРЕХ НЕЗАВИСИМО ПОЛУЧЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ПРОСТРАНСТВЕННО РАЗНЕСЕННЫХ ТОЧКАХ

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

METHOD OF DETERMINATION OF TRAVELING IONOSPHERIC DISTURBANCES VELOCITY ON THE BASE OF THE THREE INDEPENDENTLY OBTAINED ELECTRON DENSITY PROFILES IN THE SPACED POINTS

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

В данной работе рассматривается методика определения скорости перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) с помощью корреляционного анализа профилей электронной концентрации, полученных на радаре некогерентного рассеяния и ионозонде вертикального зондирования. Результаты измерений приводятся для 11 сентября 2005 г.

Method of determination of traveling ionospheric disturbances (TID) with correlation analysis of electron density profiles obtained by the incoherent scattering radar and ionosonde is considered in the paper. Results of measurements for 11 September 2005 are presented in the paper.

Алгоритм определения параметров движения ПИВ по данным радара некогерентного рассеяния и ионозонда

Исходными величинами являются электронные концентрации, измеренные ионозондом и радаром НР. Ионозонд DPS-4 расположен непосредственно в Иркутске. Радар некогерентного рассеяния (НР) расположен в 98 км к северо-западу от Иркутска. Радар НР производит измерения на частотах 158 и 154 МГц. Частота 154 МГц соответствует наклону луча радара 20° от зенита в азимутальном направлении, 263° от севера по часовой стрелке. Частота 158 МГц соответствует наклону луча радара 16° от зенита в азимутальном направлении, 212° от севера по часовой стрелке. Особенность Иркутского радара НР заключается в том, что высотный профиль электронной концентрации измеряется с помощью фарадеевских замираний и не требует калибровки ионозондом. Таким образом, инструменты позволяют получить три профиля электронной концентрации, измеренные независимо друг от друга в пространственно разнесенных точках. Взаимное расположение инструментов образует базис с характерным масштабом порядка 100 км и дает возможность измерения характеристик ПИФ.

Электронную концентрацию $N(z, t)$ как функцию времени можно с помощью полосового фильтра разделить на медленную (фоновую) $\tilde{N}(z, t)$ и быструю (возмущение) $\Delta N(z, t)$ составляющие. Разделение на медленную и быструю составляющие всегда условно, в нашем случае считается, что возмущение образовано гармониками с периодами меньшими 4 ч.

В дальнейшем предполагается, что возмущение электронной концентрации описывается простейшей моделью плоской волны (не обязательно монохроматической), т.е. имеет вид

$$\Delta N(z, t) = \Delta N_0(z) \cdot A(t - \tau(\vec{R})),$$

где $\Delta N_0(z)$ – высотный профиль возмущения; $\tau(\vec{R}) = (\vec{q}\vec{R})$, $\vec{q} = \vec{e}/V$, $\vec{R} = \{R_x, R_y, R_z\}$ – радиус-вектор точки наблюдения; $\vec{e} = \{e_x, e_y, e_z\}$ – единичный

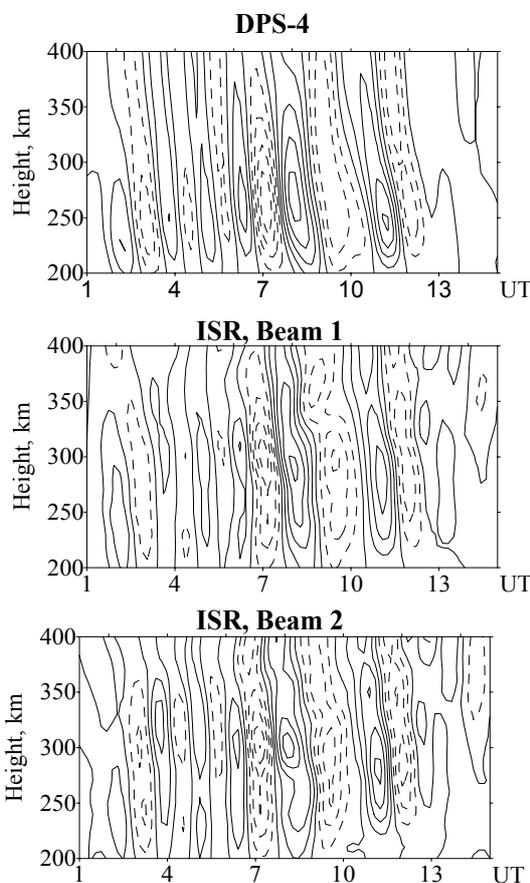


Рис. 1. Возмущения электронной концентрации 11 сентября 2005 г. в полосе 1–4 ч. LT=UT+7. Beam 1–154 МГц, Beam 2–158 МГц.

вектор, определяющий направление распространения волны; V – модуль скорости распространения волны.

Выберем Декартову систему с началом координат в точке расположения радарной антенны, осью Z , направленной по радиусу Земли вверх, осью X , направленной на север, и осью Y , направленной на восток. Тогда, согласно принятой модели, задержка между возмущениями в точках с радиус-векторами \vec{R}_1 и \vec{R}_2 составит

$$\Delta\tau(\vec{R}_1, \vec{R}_2) = (\vec{q}(\vec{R}_1 - \vec{R}_2)). \tag{1}$$

Используя задержки между возмущениями, полученными на двух лучах радара и ионозонде на каждой высоте, получаем систему линейных уравнений, позволяющую определить q_x и q_y :

$$\Delta\tau_{nm} = q_x(x_n - x_m) + q_y(y_n - y_m), \quad n, m = 1 \dots 3. \quad (2)$$

Используя задержки $\Delta\tau_z$ между возмущениями, полученными на ионозонде на различных высотах, определяем q_z :

$$q_z = \Delta\tau_z / \Delta z. \quad (3)$$

Зная все три компонента вектора \vec{q} , можно вычислить азимут, наклонение и модуль скорости распространения ПИВ.

В случае плоской монохроматической волны можно определить волновой вектор \vec{k} , связанный с разностями фаз гармоник, наблюдаемых на различных инструментах, следующими уравнениями:

$$\Delta\varphi_{nm} = k_x(x_n - x_m) + k_y(y_n - y_m), \quad n, m = 1 \dots 3, \quad (4)$$

$$k_z = \Delta\varphi_z / \Delta z. \quad (5)$$

Таким образом, для определения скорости и направления распространения ПИВ можно использовать два метода – кросскорреляционный и фазоразностный. При использовании кросскорреляционного метода задержкой считаем минимальный временной сдвиг между инструментами, обеспечивающий локальный максимум коэффициента корреляции, и проводим расчеты по формулам (2)–(3). При фазоразностном методе в спектре возмущения выделяется главная гармоника и расчеты проводятся по формулам (4)–(5).

Результаты

Результаты расчетов азимута с помощью кросскорреляционного метода представлены на рис. 2.

Из рис. 2 можно видеть, что азимут значительно изменяется в зависимости от высоты и времени. Только для интервалов 2–4 UT 230–370 км и 10–12 UT 280–380 км азимут остается примерно постоянным. Мы пришли к выводу, что изменение азимута обусловлено интерференцией нескольких ПИВ, и попробовали разделить их с помощью спектрального анализа. Спектры, рассчитанные для двух интервалов, представлены на рис. 3.

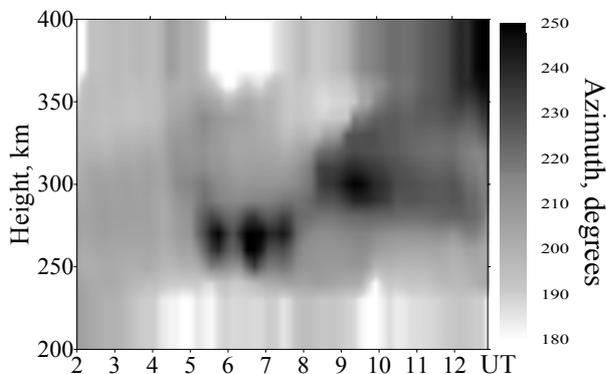


Рис. 2. Азимут.

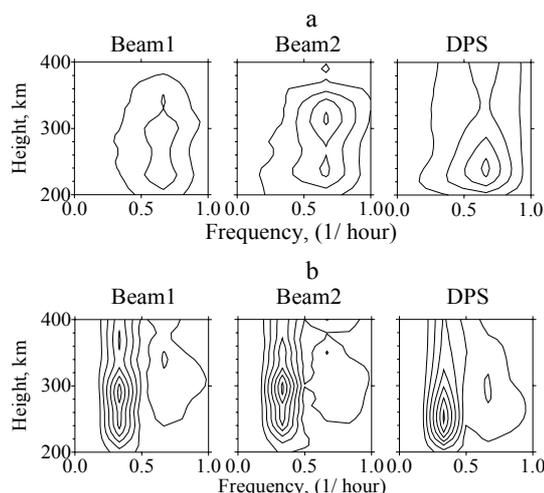


Рис. 3. Спектры для двух временных интервалов: 2–4 UT (a), 10–12 UT (b): Beam 1–154 МГц, Beam 2–158 МГц.

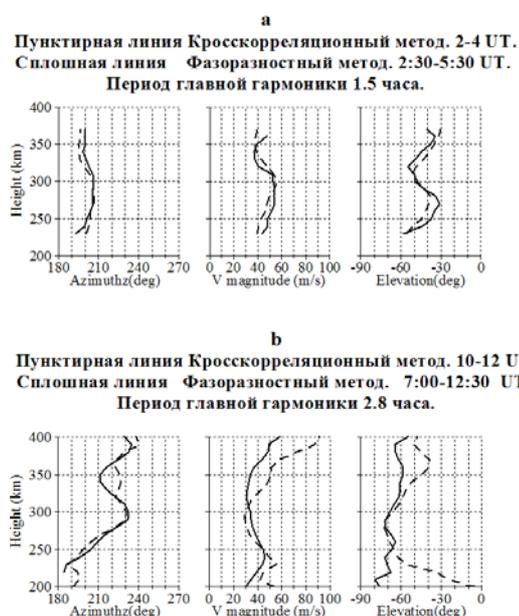


Рис. 4. Высотные профили параметров распространения ПИВ, вычисленные кросскорреляционным и фазоразностным методами.

Как можно видеть из рис. 3, для первого временного интервала период главной гармоники составляет 1.5 ч, а для второго временного интервала 2.8 ч. На рис. 4 представлены высотные профили параметров распространения ПИВ, вычисленные двумя методами (в фазоразностном методе в первом интервале период главной гармоники 1.5 ч, во втором 2.8 ч).

Существенное отклонение кросскорреляционного метода от фазоразностного для второго временного интервала объясняется тем, что в этом временном интервале, как можно видеть из рис. 3, существуют две мощные гармоники: с большей амплитудой – период 2.8 ч и с меньшей амплитудой – период 1.5 ч.