

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛНОГО ВЕКТОРА СКОРОСТИ ПИВ

**Е.А. Трофимов, А.В. Медведев**

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия  
kolowator@gmail.com

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE TID TOTAL VELOCITY VECTOR

**E.A. Trofimov, A.V. Medvedev**

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia  
kolowator@gmail.com

**Аннотация.** Изложена методика исследования пространственно-временной структуры и характеристик распространения перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) с использованием радиофизического комплекса Института солнечно-земной физики. Комплекс включает в себя Иркутский радар некогерентного рассеяния и Иркутский ионозонд DPS-4. Приводятся различные алгоритмы выделения ПИВ и расчета полного вектора скорости их распространения. Предполагается дальнейшее усовершенствование алгоритма и автоматизация процесса детектирования ПИВ.

**Ключевые слова:** ионосфера, неоднородности, перемещающиеся ионосферные возмущения, радиосигналы, диагностика.

**Abstract.** We present the method for studying the spatio-temporal structure and propagation characteristics of traveling ionospheric disturbances (TID) using the radiophysical complex of the Institute of Solar-Terrestrial Physics. The complex includes the Irkutsk Incoherent Scatter Radar (IISR) and Irkutsk Ionosonde (DPS-4). Various algorithms for identifying TIDs and calculating the total velocity vector of their propagation are given. Further improvement of the algorithm and automation of the TID detection process are expected.

**Keywords:** ionosphere, irregularities, traveling ionospheric disturbances, radio signals, diagnostics.

### ВВЕДЕНИЕ

Ионосфера как открытая динамико-физическая система нестабильна. Основные параметры ионосферной плазмы (степень ионизации, химический состав, температура заряженных и нейтральных компонент) различаются в разных временных и пространственных масштабах. Общепринято выделять в группу колебания, которые могут распространяться на значительные расстояния без изменения своей формы. Эти колебания обычно называются перемещающимися ионосферными возмущениями (ПИВ). Экспериментальные и теоретические исследования ПИВ показывают важную роль акустико-гравитационных волн в процессах взаимодействия нижней, средней и верхней атмосферы [Савина, 1993; Yigit et al., 2016]. В последние несколько лет мы наблюдаем новый всплеск интереса к этой проблеме, связанный с радиофизическими системами нового поколения для наблюдения за ионосферой, которые позволяют получить репрезентативную статистику 2D и 3D ПИВ-параметров [Nicolls, Heinselman, 2007]. В настоящее время наиболее полную информацию о высотной структуре ПИВ дают радары некогерентного рассеяния (НР). Однако для определения полного вектора скорости ПИВ необходимо проводить измерения параметров среды вдоль трех не лежащих в одной плоскости направлений. Большие полноповоротные антенные системы существующих радаров требуют значительного времени на изменение направления зондирования и, следовательно, не дают необходимого временного разрешения. Радары НР с электронным сканированием имеют ограниченный сектор обзора и, соответственно, недостаточную пространственную базу для подобных исследований. Такие измерения проводились с использованием нескольких лучей радара MU [Oliver

et al., 1988] и радара EISCAT [Ma et al., 1998]. При этом полный вектор скорости распространения ПИВ как функция высоты исследовался только во второй работе. Таким образом, определение пространственно-временной структуры скорости и направления распространения ПИВ по данным только одного радиофизического инструмента часто бывает затруднено или невозможно. Совместный анализ данных нескольких инструментов может значительно улучшить ситуацию.

В ИСЗФ СО РАН создан уникальный комплекс радиофизических инструментов для ионосферных исследований. В работе представлен метод определения высотной структуры характеристик распространения ПИВ с помощью кросскорреляционного анализа данных радара НР и ионозонда DPS-4. Исходными данными являются профили электронной концентрации, измеренные двумя лучами радара НР и ионозондом DPS-4. Электронная концентрация как функция времени, разделялась на медленную (фоновую) и быструю (возмущенную) составляющие. Измерялись задержки между ПИВ, наблюдаемыми на двух лучах радара НР и ионозонде DPS-4, а также межвысотные задержки на ионозонде. Задержки определялись по максимуму коэффициента кросскорреляции. В приближении плоской волны для каждой высоты была получена система линейных уравнений, позволяющая определить скорость и направление движения ПИВ.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 1 показана схема расположения инструментов. Радар НР расположен в начале координат. Луч 1 (Beam 1) соответствует частоте 154 МГц, луч 2 (Beam 2) — 158 МГц. В режиме измерения динамических характеристик ПИВ радар осуществляет

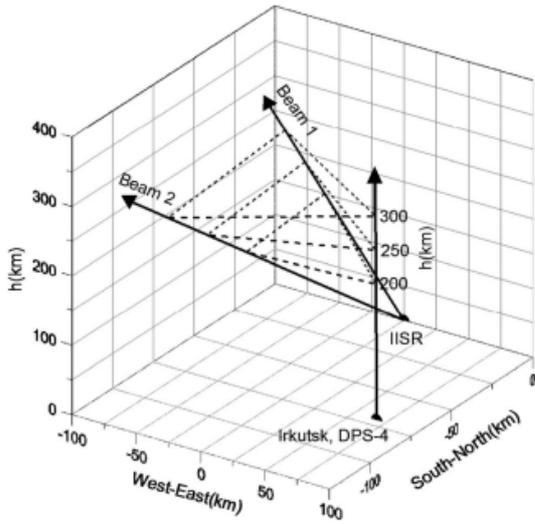


Рис. 1. Схема расположения инструментов

измерения высотных профилей рассеянных сигналов на частотах 154 и 158 МГц поочередно с изменением частоты ~25 раз/с. Частота 154 МГц соответствует наклону луча радара 10° от зенита в азимутальном направлении 263° от севера по часовой стрелке. Частота 158 МГц соответствует наклону луча радара 16° от зенита с азимутом 211°. В зависимости от отношения сигнал/шум число реализаций статистического усреднения может изменяться от 1000 до 10000, что соответствует временному разрешению при определении профилей электронной концентрации от 80 с до 13 мин в каждом из направлений.

Ионозонд DPS-4 расположен непосредственно в Иркутске и измеряет вертикальный профиль. Расстояние между инструментами ~100 км.

В основу метода определения характеристик распространения ПИВ было положено измерение времени распространения возмущений в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Предполагалось, что в любой момент в каждой точке пространства ПИВ имеет форму плоской волны

$$\Delta N_e(\vec{R}, t) = \Delta N_0(z)A(t - \tau(\vec{R})). \quad (1)$$

Задержка между  $\Delta N_e$  и ПИВ, наблюдаемыми в точках с радиус-векторами  $\vec{R}_1$  и  $\vec{R}_2$  в каждый момент времени определяется по формуле

$$\Delta\tau(\vec{R}_1, \vec{R}_2) = \vec{q} \cdot (\vec{R}_1 - \vec{R}_2), \quad (2)$$

где  $\vec{q} = \vec{e}/V$ . Используя задержки между  $\Delta N_e$ , наблюдаемыми на двух лучах радара НР и ионозонде DPS-4, на каждой высоте из (2) получаем систему линейных уравнений, определяя из них полный вектор  $\vec{q}$ , можно вычислить характеристики ПИВ ( $V, \theta, \psi$ ) для всех высот наблюдения согласно известным выражениям преобразования координат

$$V = \sqrt{1/(q_x^2 + q_y^2 + q_z^2)},$$

$$\theta = \arctg(q_z / \sqrt{q_x^2 + q_y^2}),$$

$$\psi = \begin{cases} \arctg(q_y/q_x), & q_y > 0, q_x > 0 \\ \arctg(q_y/q_x) + \pi, & q_x < 0 \\ \arctg(q_y/q_x) + 2\pi, & q_y < 0, q_x > 0 \end{cases}.$$

**РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ**

Описанные выше методы были применены для выделения возмущений и определения динамических характеристик ПИВ во время длительных периодов непрерывной работы радара НР в сентябре 2005, марте 2006 и июне 2007 г. Рассмотрим результаты обработки экспериментальных данных на примере возмущений 11 сентября 2005 г. После фильтрации в полосе периодов 1–4 ч наиболее высокий коэффициент корреляции данных (0.9 и выше) на всех трех лучах наблюдался в интервалы времени 2–4 UT в диапазоне высот 230–370 км и в 10–12 UT на высотах 280–380 км. Результаты определения параметров движения ПИВ для этих интервалов показаны на рис. 2 штриховыми линиями.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В мире существует только несколько установок, позволяющих реконструировать высотно-временную структуру неоднородностей в F2-области ионосферы. Работы на эту тему носят единичный характер и оставляют много вопросов. В частности, не находят объяснения в литературе наблюдаемая значительная вариативность азимута и наклона волнового вектора ПИВ по высоте. Многочисленные работы на основе регистрации одномерных величин (вариации критической частоты и полного электронного содержания, доплеровские измерения на одной частоте) дают порой противоречивые значения скоростей возмущений.

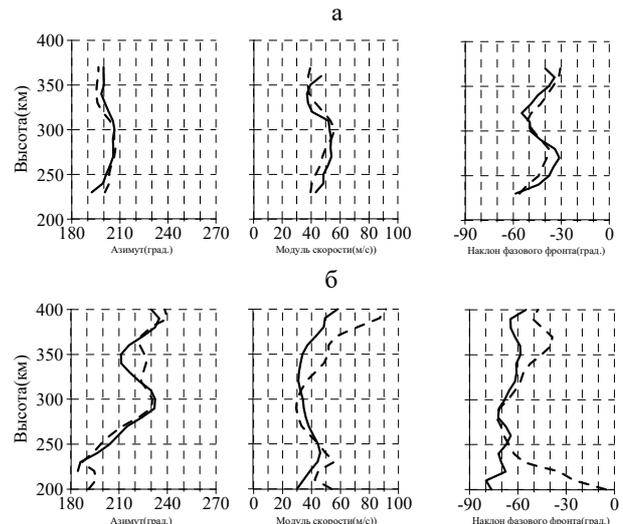


Рис. 2. Высотные профили параметров распространения ПИВ, вычисленные кросскорреляционным и фазоразностным методами: а — кросскорреляционный метод, 2–4 UT (штриховая линия), фазоразностный метод, 2:30–5:30 UT (сплошная линия). Период доминантной гармонике 1.5 ч; б – кросскорреляционный метод, 10–12 UT (штриховая линия), фазоразностный метод, 7:00–12:30 UT (сплошная линия). Период доминантной гармонике 2.8 ч

В работе изложен метод, объединяющий данные установок радиофизического комплекса ИСЗФ СО РАН: радара НР, ионозонда DPS-4, которые образуют интерферометр с базой около 100 км и позволяют определять параметры ПИВ различных масштабов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Савина О.Н. Влияние турбулентности средней атмосферы на флуктуации электронной концентрации. *Анн. геофиз.* 1993. 11. 365.

Ma S.Y., Schlegel K., Xu J.S. Case studies of the propagation characteristics of auroral TIDs with EISCAT CP2 data using maximum entropy crossspectral analysis. *Ann. Geophys.* 1998. Vol. 16, no. 2. P. 161–167.

Nicolls M.J., Heinselman C.J. Three-dimensional measurements of traveling ionospheric disturbances with the Poker Flat Incoherent Scatter Radar. *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 34.

Oliver W.L., Fukao S., Sato T., et al. Ionospheric incoherent scatter measurements with the middle and upper atmosphere radar: Observations during the large magnetic storm of February 6–8, 1986. *J. Geophys. Res.* 1988. Vol. 93, no. A12. P. 14649–14655.

Yigit E., Koucka K.P., Geogieva K., Ward W. A review of vertical coupling in the atmosphere-ionosphere system: Effects of waves, sudden stratospheric warming, space weather, and solar activity. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2016. Vol. 141. P. 1–12.