

УДК 551.510.413.5, 523.98

ВАРИАЦИИ НЕЙТРАЛЬНОГО ВЕТРА В СРЕДНИХ ШИРОТАХ НА ВЫСОТАХ F2-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ В ПЕРИОД НИЗКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

А.А. Щербаков, А.В. Медведев, Д.С. Кушнарев

VARIATIONS OF NEUTRAL WINDS AT THE F2 LAYER IN MIDDLE LATITUDES DURING LOW SOLAR ACTIVITY

A.A. Shcherbakov, A.V. Medvedev, D.S. Kushnarev

В работе представлено исследование длинных непрерывных рядов данных скоростей дрейфа ионизированной компоненты плазмы вдоль луча зрения радара, приведены расчеты скоростей нейтрального меридионального ветра и скорости амбиполярной диффузии на высотах F2-слоя, полученных с помощью ИРНР в период низкой солнечной активности в 2008–2009 гг. Проанализирована среднесуточная динамика по сезонам года. Проведено сопоставление с результатами, полученными на других среднеширотных установках некогерентного рассеяния, а также с результатами моделирования.

The report presents a study of long continuous series data of ionized component drift velocities along the radar line of sight, given the calculations of the neutral meridional wind velocities, as well as the rate of ambipolar diffusion on the heights of F2 layer, obtained by IRNR at low solar activity period at 2008–2009. Analyzed the average dynamics in each season of year. A comparison with results obtained in other mid-latitude incoherent scatter facilities, as well as with the simulation results, is shown.

Введение

Развитие современной практической космонавтики постоянно требует от нас актуальной информации о динамике ионосферы, цельное представление о которой невозможно получить без наблюдения картины ионосферных дрейфов и ветров. Попытки оценить скорость нейтральных ветров на ионосферных высотах предпринимаются давно. Первая литература по данной теме относится еще к семидесятым годам прошлого века. И если на высотах 80–115 км поведение нейтрального ветра достаточно хорошо изучено [Казимировский, Кокоуров, 1979] в основном благодаря анализу метеорных следов, то до создания сети радаров некогерентного рассеяния информация о скоростях нейтрального ветра на высотах F2-слоя (особенно в средних широтах) была фрагментарной и ее получение было сопряжено с большими экспериментальными трудностями. Радары НР позволяют оценить скорость дрейфа ионов, а также электронную концентрацию, электронные и ионные температуры и благодаря этому получить такие производные величины, как скорость амбиполярной диффузии и, соответственно, скорость нейтрального ветра.

С развитием метода НР стало возможным проводить регулярные наблюдения ионосферы. Однако радаров НР очень мало, а среднеширотных еще меньше, поэтому информация с каждого из них по-своему уникальна.

Следует отметить также, что в исследованиях фундаментальных проблем физики ионосферы всегда большое внимание уделялось данным наблюдений в периоды низкой солнечной активности, когда появлялась возможность минимизировать часть внешних факторов воздействия на среду. Период 2007–2009 гг. с этой точки зрения стал уникальным в истории аппаратных наблюдений. С января 2008 по март 2009 г. (за исключением нескольких дней) значение индекса F10.7 не превышало 70 с.е.п., а с лета 2007 по лето 2009 г. – 75 с.е.п [Медведев и др., 2010].

Таким образом, целью нашей работы стало получение информации о среднеширотной скорости меридионального ветра в минимуме солнечной активности над Иркутском с помощью Иркутского радара

некогерентного рассеяния (ИРНР). Нашей целью было также сравнение полученных результатов с результатами моделирования и выводами других авторов.

Методика

Все движения в ионосфере можно условно разделить на две категории – ветра и дрейфы. Под ветрами в ионосфере понимаются движения нейтральной атмосферы, глобальные по масштабу и медленно меняющиеся со временем. Главными управляющими процессами для данного типа движения являются неравномерное нагревание и охлаждение атмосферы и действие возникающих при этом градиентов давления, что и отличает ветер от дрейфов ионизированной компоненты, которая движется под действием диффузионных процессов, электрических полей и непосредственно самих нейтральных ветров.

Ветер можно разделить на зональный и меридиональный. В данной работе мы рассмотрим последний, заставляющий плазму дрейфовать вдоль силовых линий магнитного поля. Из общих предпосылок следует, что ветер дует от разогретой части атмосферы к холодной и, соответственно, днем меридиональный ветер должен быть направлен к полюсу, а ночью к экватору.

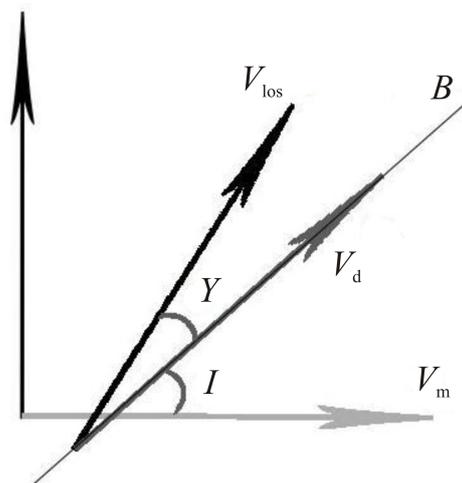


Рис. 1. Геометрия эксперимента.

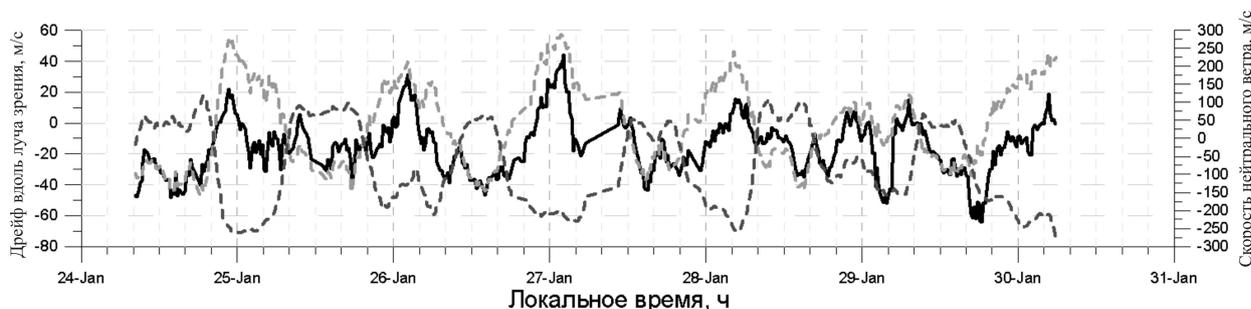


Рис. 2. Скорости дрейфа плазмы, амбиоплярной диффузии и нейтрального ветра на высоте 270 км зимой 2008 г.

ИРНР позволяет нам измерять скорость дрейфа плазмы вдоль луча зрения радара [Shcherbakov et al., 2009]. Таким образом, чтобы оценить скорость нейтрального меридионального ветра, нам необходимо исключить из лучевой скорости дрейфа влияние амбиоплярной диффузии и электрических полей [Titheridge, 1991]. Влиянием электрических полей можно пренебречь, как известно, мощность их в средних широтах невелика. С амбиоплярной диффузией все намного сложнее. Ее роль и влияние с высотой только возрастают (в отличие от нейтрального ветра, который с высотой меняется незначительно), и распределение ионизации в области F во многом определяется именно диффузионными процессами.

Для расчета скорости амбиоплярной диффузии воспользуемся формулой, предложенной в [Брюнелли, Намгаладзе, 1988]:

$$V_d = -\sin ID \left[\frac{\partial n_e}{\partial h} \frac{1}{n_e} + \left(\frac{1}{T_p} \frac{\partial T_p}{\partial h} + \frac{1}{H_p} \right) \right], \quad (1)$$

где H_p – плазменная шкала высот, а D – коэффициент амбиоплярной диффузии:

$$H_p = \frac{kT_p}{m^+ g_{\parallel}}, \quad (2)$$

$$D = \frac{kT_p}{m^+ \nu_{in}}. \quad (3)$$

Таким образом, чтобы рассчитать скорость ветра, нам необходимо исключить влияние скорости амбиоплярной диффузии из полученной нами скорости дрейфа плазмы вдоль луча радара. Исходя из геометрии нашего эксперимента, представленной на рис. 1, для расчета используем следующее выражение:

$$V_m = (V_{los} \cos Y - V_d) / \cos I. \quad (4)$$

Результаты

На рис. 2 представлены результаты обработки данных, полученных на ИРНР во время зимнего эксперимента в 2008 г. Сплошной линией на рисунке представлена лучевая скорость дрейфа плазмы, темной штриховой кривой – скорость амбиоплярной диффузии, а светлой штриховой кривой – скорость нейтрального меридионального ветра. Правая шкала относится к ветрам, левая к дрейфу и диффузии.

На графике положительным направлением ветра принято направление к экватору, а отрицательным – к полюсу.

Ниже представлены результаты для высоты 270 км, полученные летом и осенью 2008 г. и весной 2009 г. (рис. 3, 4, 5). Можно отметить, что во все сезоны просматривается устойчивый суточный ход скоростей. Зимой (рис. 3) скорость амбиоплярной диффузии днем периодически выходит в положительную область. В остальные сезоны года она отрицательна в течение всех суток. Во все сезоны скорость ветра направлена к экватору в ночное время и к полюсу в дневное. Наибольшие по амплитуде значения скорости ветра получены в ходе зимнего эксперимента (рис. 3), наименьшие – в ходе летнего эксперимента (рис. 4).

На рис. 6 приведено сравнение полученных нами скоростей ветров со скоростями, полученными с помощью модели Тащилина–Романовой (ТаРо), разработанной в нашем институте [Тащилин, Романова, 1998]. Как можно увидеть, результаты неплохо согласуются в дневное и вечернее время, однако в ночное время имеется существенное расхождение.

Заключение

В работе представлены уникальные для Сибирского региона данные по среднеширотной динамике верхней атмосферы в период низкой солнечной актив-

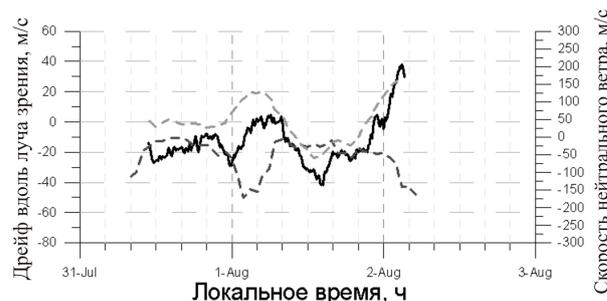


Рис. 3. Скорости дрейфа плазмы, амбиоплярной диффузии и нейтрального ветра на высоте 270 км летом 2008 г.

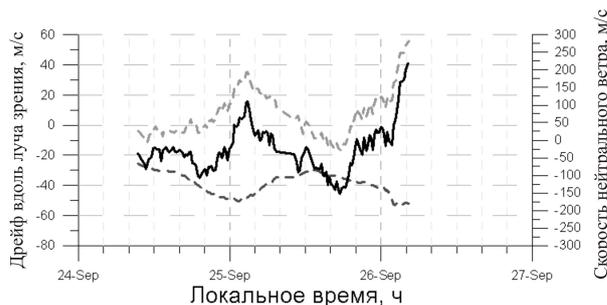


Рис. 4. Скорости дрейфа плазмы, амбиоплярной диффузии и нейтрального ветра на высоте 270 км осенью 2008 г.

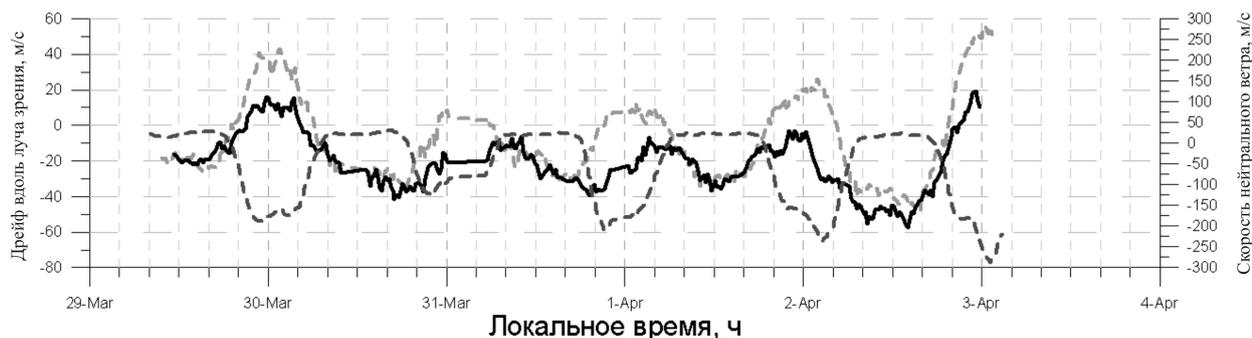


Рис. 5. Скорости дрейфа плазмы, амбиполярной диффузии и нейтрального ветра на высоте 270 км весной 2009 г.

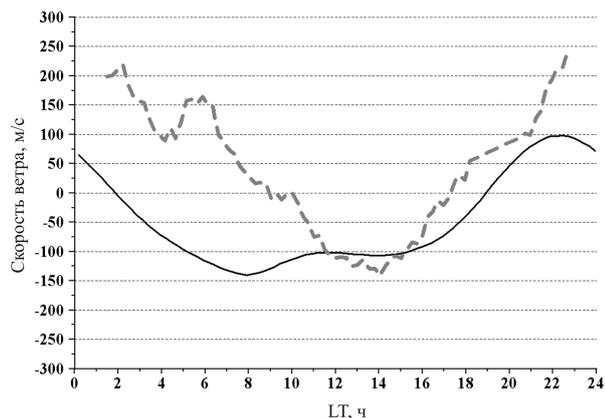


Рис. 6. Сравнение полученных результатов с моделью ТаРо.

ности. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами, полученными на других установках ИР, в частности, на радаре EISCAT [Titheridge, 1991; Witasse et al., 1998] и на радаре MU [Zhanga et al., 1999]. Также проведено сравнение полученных результатов с результатами моделирования.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 11-05-00698-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 527 с.
 Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д. Движения в ионосфере. Новосибирск: Наука, 1979. 344 с.
 Медведев А.В., Жеребцов Г.А., Куркин В.И. и др. Исследование динамических процессов в ионосфере в период низкой солнечной активности по данным радиофизиче-

ского комплекса ИСЗФ СО РАН // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 4. С. 117–126.

Тащилин А.В., Романова Е.Б. Глобальная модель крупномасштабной структуры F-области ионосферы // Физика ионосферы и атмосферы Земли: тез. докл. Междунар. конф., посв. 50-летию ионосферных исслед. в г. Иркутске (16–18 июня 1998 г.). Иркутск, 1998. С. 129–131.

Griffin E.M., Aruliah A., Muller-Wodarg I.C.F., Aylward A. Comparison of high-latitude thermospheric meridional winds. I. Optical and radar experimental comparisons // Ann. Geophys. 2004. V. 22: P. 849–862.

Griffin E.M., Aruliah A., Muller-Wodarg I.C.F., Aylward A. Comparison of high-latitude thermospheric meridional winds. II. Combined FPI, radar and model climatologies // Ibid. 2004. V. 22. P. 863–876.

Shchepkin L.A., Kuznetsova G.M., Kushnarenko G.P., Ratovsky K.G. Calculations of the ionization drift velocity by the Titheridge Method, based on the data obtained at the Irkutsk Digisonde // Geomagnetism and Aeronomy. 2009. V. 49, N 8 (Special Issue 2). P. 1308–1310.

Shcherbakov A.A., Medvedev A.V., Kushnarev D.S. Correlation method for determining the ionospheric plasma drift velocity at the Irkutsk incoherent scatter radar // Ibid. 2009. V. 49, N 7. P. 1028–1033.

Zhanga S.-R., Fukao S., Oliver W.L., Otsuka Y. The height of the maximum ionospheric electron density over the MU radar // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1999. V. 61. P. 1367–1383.

Titheridge J.A. Mean meridional wind in the ionosphere at 70 N // Planet Space Sci. 1991. V. 39, N 5. P. 657–669.

Witasse O., Liliensten J., Lathuillere C., Pibaret B. Meridional thermospheric neutral wind at high latitude over a full solar cycle // Ann. Geophys. 1998. V. 16. P. 1400–1409.

Институт солнечно-земной физики, Иркутск