

С.В. ГРИНЧЕНКО, н.с., Институт ионосферы, Харьков

ПОСТРОЕНИЕ ВЕКТОРНОГО ПОЛЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НЕЙТРАЛЬНЫХ ВЕТРОВ

Рух заряджених частинок іоносферної плазми вздовж ліній магнітного поля Землі відбувається, зокрема, під дією горизонтальних вітрів частинок нейтральної атмосфери. Для аналізу варіацій нейтральних вітрів запропоновано алгоритм побудови планетарного розподілу векторів швидкостей, реалізований у середовищі Visual Fortran. Аналіз векторного поля вітрів показує сезонні відмінності поведінки нейтральних вітрів, що мають вплив на формування висотного профілю електронної концентрації.

Движение заряженных частиц ионосферной плазмы вдоль линий магнитного поля Земли происходит, в частности, под действием горизонтальных ветров частиц нейтральной атмосферы. Для анализа вариаций нейтральных ветров предложен алгоритм построения планетарного распределения векторов скоростей, реализованный в среде Visual Fortran. Анализ векторного поля ветров показывает сезонные различия поведения нейтральных ветров, оказывающие влияние на формирование высотного профиля электронной концентрации.

The motion of ionospheric plasma charge particles along the Earth's magnetic field occurs, in particular, under the influence of horizontal neutral particle winds. To analyze the variations of neutral winds, an algorithm for the construction of the planetary distribution of velocity vectors is offered. It's realized in Visual Fortran environment. The wind vector field analysis shows seasonal distinctions of the neutral wind behaviour, influencing formation of electron density high profile.

Постановка задачі. Одно из направлений исследования ионосферы – это изучение явлений переноса плазмы. При изучении этих явлений различают движение нейтральной среды и движение ионизированной компоненты ионосферной плазмы. Движение плазмы определяется, во-первых, диффузией ионов в нейтральной среде. Во-вторых, горизонтальное движение нейтральных ветров вынуждает заряженные частицы плазмы двигаться вдоль магнитных линий. В-третьих, на заряженные частицы плазмы оказывают влияние электрические поля, генерируемые в так называемой динамо-области. В настоящее время для вычисления скоростей горизонтального движения нейтральных ветров в основном используются различные эмпирические модели. Наибольшее распространение получила модель HWM93. Исходный фортрановский код программы, описывающей эту модель, находится в открытом доступе на официальном сайте NASA.

В данной работе решается две задачи. Первая – разработка алгоритма построения векторного поля нейтральных ветров в географических координатах широты и долготы северного полушария Земли путём пересчёта меридиональной (долготной) и зональной (широтной) составляющих скорости в проекции прямоугольной системы координат экрана компьютера. И вторая – анализ вариаций параметров нейтрального ветра на основе данных, полученных с помощью программы построения поля ветров.

Построение векторного поля нейтральных ветров средствами Фортрана удобно тем, что позволяет в рамках одного фортрановского проекта проводить вычисления и выводить результаты в виде таблиц и графических рисунков. Использование языка Фортран обусловлено 50-летней историей написания программ расчёта параметров ближнего космоса: магнитного поля Земли, характеристик солнечного излучения, температуры и концентраций нейтральных компонент, температур ионов и электронов и других величин.

Horizontal Neutral Wind Model 93 (HWM 93) – эмпирическая модель горизонтального нейтрального ветра. Она основана на данных ветра, полученных с помощью спутниковых измерений. Первая версия модели (HWM87), выпущенная в 1987 году [1], описывала ветры выше 220 км. С включением данных ветра, полученных при помощи радаров некогерентного рассеяния и оптических интерферометров, модель HWM90 [2] была расширена вниз до 100 км. С использованием метеорных данных новая версия модели HWM93 [3] была расширена до поверхности Земли. Модель учитывает вариации солнечной активности и магнитного поля Земли.

Модель HWM93 позволяет рассчитывать меридиональный ветер (положительное значение обозначает северное направление) и зональный ветер (положительное значение которого соответствует восточному направлению). Входными параметрами модели являются номер дня в году, высота, географические широта и долгота, истинное время, усреднённый индекс $F_{10.7}$ солнечной активности, индекс $F_{10.7}$ в предыдущий день, магнитный индекс A_p .

Построение векторного поля горизонтальных нейтральных ветров.

Координаты точки расчёта значений компонент вектора скорости нейтрального ветра по модели HWM93 – это географические широта φ (для северного полушария $0 \leq \varphi < \pi/2$) и долгота λ ($0 \leq \lambda < 2\pi$). Начало прямоугольных координат x, y экрана находится в верхнем левом углу. Пусть северный полюс имеет экранные прямоугольные координаты x_0, y_0 . Считая координату φ измеряемой в линейных единицах длины (см. рис. 1), получаем соотношения между координатами φ, λ и x, y :

$$\begin{cases} x = x_0 - r \cos \lambda = x_0 - \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) \cos \lambda \\ y = y_0 + r \sin \lambda = x_0 + \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) \sin \lambda \end{cases}, \text{ где } r = \pi/2 - \varphi.$$

Для проверки написанных формул вычислим x, y при $\lambda = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$:

$$\lambda = 0 \Rightarrow \begin{cases} x = x_0 - r = x_0 - \left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right); \\ y = y_0 \end{cases}$$

$$\lambda = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \begin{cases} x = x_0 \\ y = y_0 + r = x_0 + \left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right); \end{cases}$$

$$\lambda = \pi \Rightarrow \begin{cases} x = x_0 + r = x_0 + \left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right); \\ y = y_0 \end{cases}$$

$$\lambda = \frac{3\pi}{2} \Rightarrow \begin{cases} x = x_0 \\ y = y_0 - r = x_0 - \left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right). \end{cases}$$

Меридиональный ветер – это проекция вектора нейтрального ветра на меридиональные линии, т.е. на направление положительного отсчёта широты φ : $v_{\text{mer}} = v_{\varphi}$. Если $v_{\varphi} > 0$, нейтральный ветер направлен к северному полюсу, при $v_{\varphi} < 0$ нейтральный ветер имеет южное направление. Зональный ветер представляет собой проекцию вектора нейтрального ветра на широтные линии, т.е. на направление положительного отсчёта долготы λ : $v_{\text{zon}} = v_{\lambda}$. Если $v_{\lambda} > 0$, нейтральный ветер направлен с запада на восток, при $v_{\lambda} < 0$ он имеет западное направление.

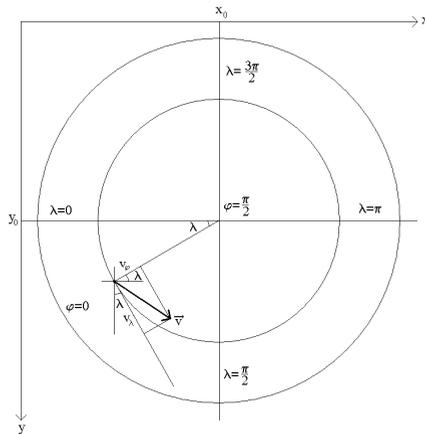


Рис. 1. Построение вектора нейтральной скорости в прямоугольных координатах экрана по его меридиональной и зональной компонентам

Так как $(v_\varphi)_x = v_\varphi \cos \lambda$, $(v_\varphi)_y = -v_\varphi \sin \lambda$,

$$(v_\lambda)_y = v_\lambda \cos \lambda, (v_\lambda)_x = v_\lambda \sin \lambda,$$

то $v_x = (v_\varphi)_x + (v_\lambda)_x = v_\varphi \cos \lambda + v_\lambda \sin \lambda$,

$$v_y = (v_\varphi)_y + (v_\lambda)_y = -v_\varphi \sin \lambda + v_\lambda \cos \lambda.$$

В частности, при $\lambda = 0$ компоненты векторов $(v_\varphi)_x = v_\varphi$, $(v_\varphi)_y = 0$,
 $(v_\lambda)_y = v_\lambda$, $(v_\lambda)_x = 0$.

Рисование стрелок вектора нейтральной скорости в среде Visual Fortran. Написанные формулы позволяют находить начало и конец вектора скорости. Теперь разработаем вопрос построения стрелок вектора \vec{AB} . Точки $A(x, y)$, $B(x_1, y_1)$ являются началом и концом вектора (см. рис. 2). Координаты x_2, y_2 точки C найдём, исходя из того, что $\frac{CB}{AB} = \frac{1}{n}$, где n – любое заданное число. Так как $\frac{x_1 - x_2}{x_1 - x} = \frac{1}{n}$, то $x_2 = x_1 - \frac{x_1 - x}{n}$. Аналогично, $y_2 = y_1 - \frac{y_1 - y}{n}$.

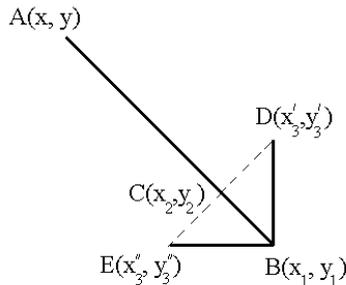


Рис. 2. Координаты концов вектора и стрелок

Выразим координаты точек $D(x'_3, y'_3)$ и $E(x''_3, y''_3)$ – концов стрелок. Так как вектора $\vec{CB} = (x_1 - x_2)\vec{i} + (y_1 - y_2)\vec{j}$ и $\vec{CD} = (x_3 - x_2)\vec{i} + (y_3 - y_2)\vec{j}$ взаимно перпендикулярны, то $\vec{CB} \cdot \vec{CD} = (x_1 - x_2)(x_3 - x_2) + (y_1 - y_2)(y_3 - y_2) = 0$. Из равенства $CB = CD$ следует, что $(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 = (x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2$. Таким образом, для нахождения x_3, y_3 имеем систему уравнений

$$\begin{cases} (x_1 - x_2)(x_3 - x_2) + (y_1 - y_2)(y_3 - y_2) = 0 \\ (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 = (x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 \end{cases}$$

Решая систему уравнений относительно x_3 и y_3 , получаем

$$x_3 = x_2 \mp (y_1 - y_2), \quad y_3 = y_2 \pm (x_1 - x_2).$$

Полученные формулы позволяют вычислить координаты (x_3', y_3') и (x_3'', y_3'') концов вектора скорости.

Сравнение карты распределения нейтральных ветров северного полушария для зимних и летних условий. На рис. 3 показано распределение векторов горизонтального нейтрального ветра в день зимнего солнцестояния 22 декабря (356-ый день в году) и день летнего солнцестояния 22 июня (173-ий день в году) на высоте 400 км для спокойных условий магнитного поля ($A_p = 2$) и минимума солнечной активности ($F_{10.7} = 100$).

Общим для зимних и летних условий является то, что около полудня ветер направлен к полюсу, а около полуночи – к экватору; скорость ветра больше на ночной стороне, чем на дневной. Следовательно, ветер дует от тёплой части атмосферы (полуденный сектор) к холодной (ночной сектор) через полярные области и зонально вокруг Земли на низких широтах. На планетарное распределение нейтральных ветров оказывают влияние “приливные” волны солнечного и лунного происхождения, кориолисова сила и другие эффекты.

В работе [4] отмечается существование вертикального нейтрального ветра. При этом, если в области D вертикальные движения очень медленные (от 1 см/с до 1 м/с), а на высотах около 300 км скорость вертикального ветра равна примерно 2 – 3 м/с, причём днём он направлен вверх, а ночью – вниз. Вертикальные скорости связаны с существенным на высотах ионосферы нагреванием и охлаждением.

Для исследования вопроса влияния горизонтальных нейтральных ветров на состояние ионосферы на широте расположения измерительного комплекса некогерентного рассеяния Института ионосферы существенным является то обстоятельство, что в околополуденное время на высотах выше 300 км меридиональный ветер в зимнее и летнее время имеет противоположные направления. В зимнее время меридиональная составляющая нейтрального ветра направлена к полюсу, а летом – к экватору.

Вертикальная составляющая скорости движения ионов O^+ , доминирующих в F2-области, $v_z = v_{\text{диф}} + v_{\text{эл}} + v_{\text{маг}}$. Вертикальная составляющая скорости диффузии $v_{\text{диф}}$ определяется концентрацией ионов O^+ , температурами ионов и электронов, ион-нейтральными соударениями. Вертикальная составляющая скорости движения ионов, обусловленная дрейфом заряженных частиц в геомагнитном поле, $v_{\text{маг}} = v_{\text{мер}} \sin I / \cos I$, где I – наклонение магнитного поля (в месте расположения Харьковского радара некогерентного рассеяния угол $I \approx -66^\circ$). Зимой меридиональная составляющая $v_{\text{мер}} > 0$, скорость дрейфа отрицательна. Летом на высотах

больше 300 км $v_{\text{мер}} < 0$, скорость дрейфа направлена вверх. Это обстоятельство является основополагающим в объяснении сезонных вариаций электронной концентрации и общей скорости движения плазмы [5, 6, 7].

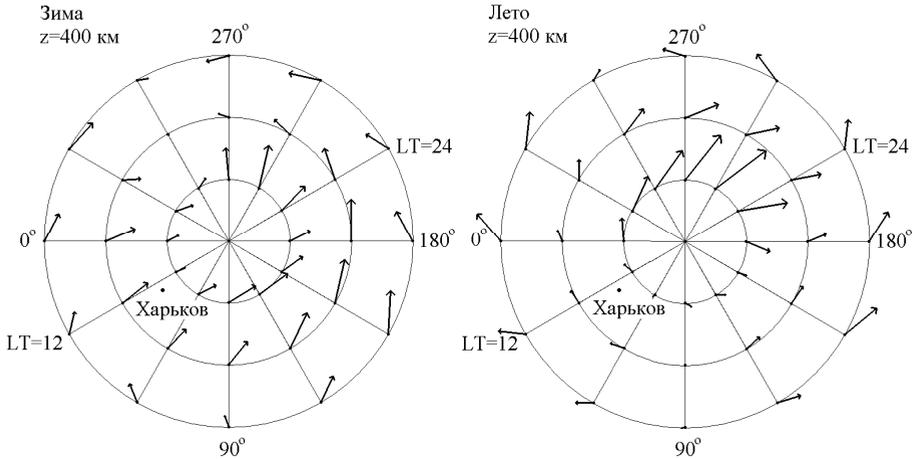


Рис. 3. Планетарное распределение горизонтальных нейтральных ветров в дни зимнего и летнего солнцестояний

Вариации суточного хода горизонтальных ветров в области F среднеширотной ионосферы. Сравним суточный ход ветров в дни зимнего (рис. 4) и летнего (рис. 5) солнцестояний. Величины ветров в период низкой солнечной активности изменяются в пределах от -100 до 100 м/с. Зимой зональный ветер меняет направление с восточного на западное примерно в 5 LT, около 12 LT зональный ветер меняет направление на обратное. Летом зональный ветер принимает восточное направление примерно в 13 LT, но в 20 LT зональный ветер меняет направление. Таким образом, на высотах области F летом зональный ветер имеет восточное направление в течение 7 часов (и 17 часов – западное), а в зимнее время зональный ветер имеет восточное направление в течение 17 часов (соответственно, западное – 7 часов). Меридиональный ветер имеет положительное направление (т.е. от экватора к полюсу) зимой с 6 до 20 LT. В день летнего солнцестояния меридиональный ветер имеет отрицательные значения (т.е. направлен от северного полюса к экватору) и только на высоте 200 км примерно с 10 до 14 LT имеет положительное значение.

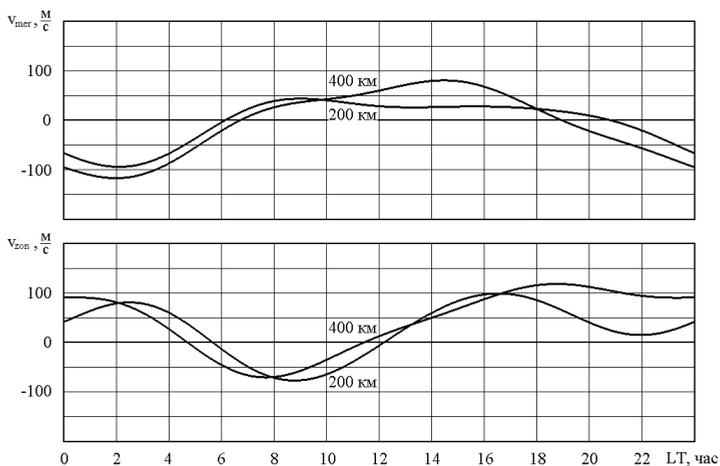


Рис. 4. Суточные вариации меридиональных и зональных ветров в день зимнего солнцестояния

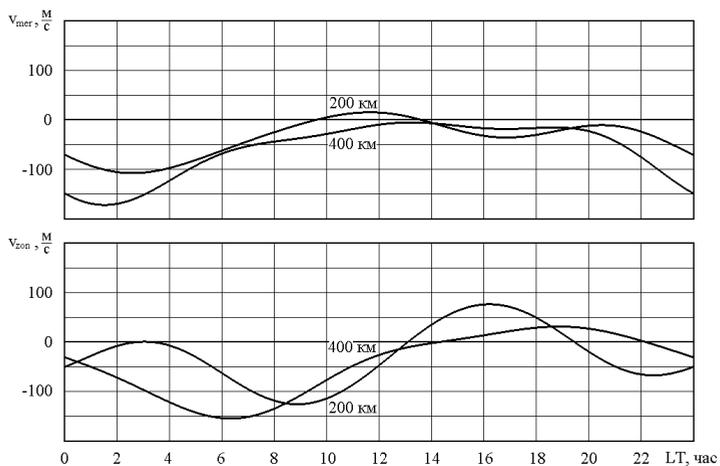


Рис. 5. Суточные вариации меридиональных и зональных ветров в день летнего солнцестояния

Выводы. Анализ планетарного распределения горизонтальных нейтральных ветров показывает сезонные отличия меридионального ветра

нейтральной среды. Зимой меридиональный ветер дует к северному полюсу, вследствие чего скорость дрейфа ионосферной плазмы направлена вниз. Летом на высотах больше 300 км меридиональный ветер дует к экватору, скорость дрейфа направлена вверх.

Список литературы: 1. *Hedin A.E., Spencer N.W., Killeen T.L.* Empirical Global Model of Upper Thermosphere Winds Based on Atmosphere and Dynamics Explorer Satellite Data // *J. Geophys. Res.* – 1988. – V. 93. – P. 9959 – 9978. 2. *Hedin A.E. et al.* Revised Global Model of Thermosphere Winds Using Satellite and Ground-Based Observations // *J. Geophys. Res.* – 1991. – V. 96. – P. 7657 – 7688. 3. *Hedin A.E. et al.* Empirical Wind Model for the Upper, Middle and Lower Atmosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1996. – V. 58. – P. 1421 – 1447. 4. *Казимировский Э.С., Кокуров В.Д.* Движения в ионосфере. – Новосибирск: Наука, 1979. – 344 с. 5. *Rishbeth H.* How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-Layer // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* – 1998. – V. 60. – P. 1385 – 1402. 6. *Гринченко С.В.* Связь скорости переноса плазмы и электронной концентрации области F2 околополюденной ионосферы // *Геомагнетизм и аэронавигация.* – 1992. – Т. 32. – С. 136 – 138. 7. *Гринченко С.В., Емельянов Л.Я., Лысенко В.Н.* Сезонные вариации скорости переноса плазмы околополюденной ионосферы по данным некогерентного рассеяния // *Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье. Сборник научных трудов ХГПУ. Часть третья.* – 1999. – Вып. 7. – С. 337 – 339.

Поступила в редколлегию 12.10.2011