

ДИНАМИКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 30 ОКТЯБРЯ 2003 г.

Э.Л. Афраймович, Э.И. Астафьева, Е.А. Косогоров

SPATIAL DISTRIBUTION OF TOTAL ELECTRON CONTENT DURING THE STRONG MAGNETIC STORM ON OCTOBER, 30 2003.

E.L. Afraimovich, E.I. Astafyeva, E.A. Kosogorov

Разработан новый метод построения глобального поля скоростей перемещения регулярной составляющей полного электронного содержания (ПЭС). С помощью предложенного метода на примере сильной геомагнитной бури 30 октября 2003 г. показано, что главная фаза бури сопровождалась образованием на юго-западе США области с аномально высоким значением ПЭС – до 200 TECU (10^{16} м^{-2}). При этом средняя скорость перемещения изолиний ПЭС достигала аномально высокой величины 400 м/с, что в 4 раза превышало значение скорости в магнитоспокойный период.

A new method of picturing of regular component of total electron content (TEC) is proposed. Using the method it is shown that during the main phase of the magnetic storm on October, 30 2003 TEC values reached anomaly high values of order of 200 TECU (10^{16} m^{-2}). The mean velocity of TEC isolines exceeded 400 m/s that is 4 times higher mean velocity during the undisturbed conditions.

Введение

В последнее время создана новая технология GIM построения глобальных карт полного электронного содержания по данным международной сети приемников GPS [1, 2]. В совокупности с возможностью получения карт ПЭС в стандартном формате IONEX по сетям Интернет технология GIM представляет новое средство для исследования ионосферных процессов. Так, с использованием GIM-технологии были получены новые данные о глобальном развитии крупномасштабных ионосферных возмущений во время больших ионосферных бурь [2]. Однако GIM-карты отражают лишь распределение ПЭС, в то время как разработанный в нашей работе метод позволяет оценить скорость перемещения изолиний ПЭС.

Пространственный диапазон карт GIM с двухчасовым временным разрешением в стандартном формате IONEX – от 0° до 360° по долготе и от -90° до 90° по широте. Размер элементарной ячейки GIM с узлами a, b, c, d определяется стандартом файла IONEX и составляет 5° по долготе и 2.5° по широте. Для упрощения преобразований для широт, не превышающих 60° , ячейку можно представить как прямоугольник со сторонами d_e и d_n . Для каждого момента времени t для узлов a, b, c, d из файла IONEX известны значения вертикального ПЭС I_a, I_b, I_c, I_d .

Определение направления и скорости перемещения изолиний равного ПЭС

Наш метод основан на измерении производных ПЭС по времени $I'_t(t)$ и по пространству $I'_y(t)$ и $I'_x(t)$ [3]. В простейшей форме пространственно-временные изменения ПЭС $\Delta I(t, x, y)$, пропорциональные приращению фазы трансionoсферного сигнала $\Delta \phi(t, x, y)$, в каждый данный момент времени t можно представить в виде плоского фронта, перемещающегося без изменения формы (отсутствие дисперсии):

$$\Delta \phi(t, x, y) = F \left(t - \frac{x}{u_x} - \frac{y}{u_y} \right), \quad (1)$$

где $u_x(t)$ и $u_y(t)$ – скорости движения фронта ПЭС вдоль осей x и y соответственно.

Использование производных ПЭС дает возможность установить однозначно ориентацию $\alpha(t)$ волнового вектора $\mathbf{K}$ в диапазоне $0^\circ \div 360^\circ$, а также определить модуль горизонтальной скорости $u(t)$ в каждый данный момент времени по формулам

$$\begin{aligned} u_x(t) &= \frac{\phi'_t(t)}{\phi'_x(t)} = \frac{u(t)}{\cos \alpha(t)}, \\ u_y(t) &= \frac{\phi'_t(t)}{\phi'_y(t)} = \frac{u(t)}{\sin \alpha(t)}, \\ u(t) &= |u_x(t)u_y(t)| \left(u_x^2(t) + u_y^2(t) \right)^{-1/2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Применение процедуры (2) к уравнению (1) полностью определяет азимут и фазовую скорость перемещения изолинии ПЭС. Значения производных для выбранной ячейки карты можно получить, используя приращения ПЭС для всех четырех узлов ячейки и для двух моментов времени t_1 и $t_2 = t_1 + dt$.

$$\begin{aligned} I'_x &= (I_{c1} - I_{b1} + I_{d1} - I_{a1} + \\ &+ I_{c2} - I_{b2} + I_{d2} - I_{a2}) / 4d_e, \\ I'_y &= (I_{a1} - I_{b1} + I_{d1} - I_{c1} + I_{a2} - I_{b2} + I_{d2} - I_{c2}) / 4d_n, \\ I'_t &= (I_{a2} - I_{a1} + I_{b2} - I_{b1} + I_{c2} - I_{c1} + I_{d2} - I_{d1}) / 4d_t. \end{aligned} \quad (3)$$

Процедуры (2) и (3) выполняются для всех ячеек выбранного пространственного диапазона и для выбранного интервала времени суток. Один из вариантов представления данных заключается в полном использовании формата IONEX с тем отличием, что вместо значений ПЭС в соответствующие ячейки карты записываются значения скорости $\mathbf{u}$ и направления α .

Данные в полученном таким образом формате VELONEX считываются любыми стандартными процедурами чтения карт IONEX, что существенно облегчает использование нового формата. Выходные данные могут быть представлены с помощью нашей программы не только как набор величин скорости $\mathbf{u}$ и направления α в формате VELONEX, но и

в виде массивов данных, которые можно непосредственно использовать для построения поля скоростей в графическом редакторе GRAFER.

Динамика ПЭС во время магнитной бури 30 октября 2003 г.

На рис. 1 изображены карты ПЭС на территории Северной Америки для трех интервалов времени: 17:00 UT (а), 19:00 UT (б), 21:00 UT (в). На изолиниях ПЭС нанесены значения вертикального ПЭС в TECU. Штриховой линией отмечено положение южной границы аврорального овала для 18:41 UT и 21:54 UT 30 октября 2003 г. Интервал 17:00 UT (рис. 1, а) предшествует началу главной фазы бури, интервал 19:00 UT – начальной стадии главной фазы бури (рис. 1, б), а 21:00 UT (рис. 1, в) – максимальной фазе. Как видно из рис. 1, главная фаза бури сопровождалась образованием на юго-западе США области с аномально высоким значением ПЭС – до 200 TECU.

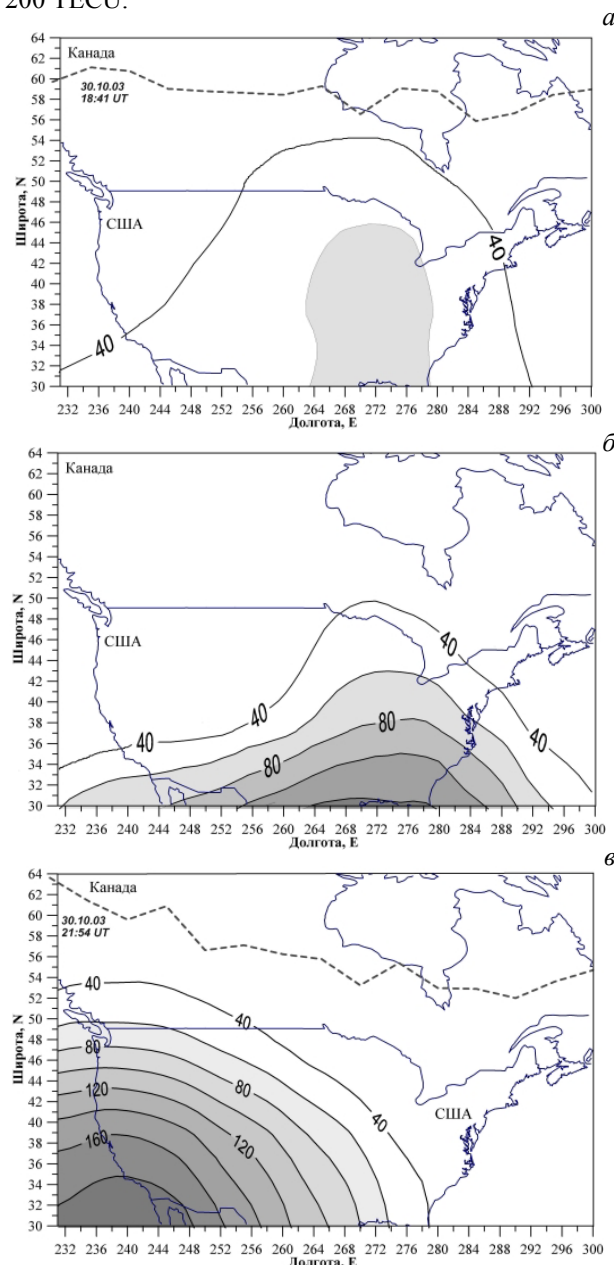


Рис. 1. Изменение абсолютного ПЭС во время магнитной бури 30 октября 2003 г.

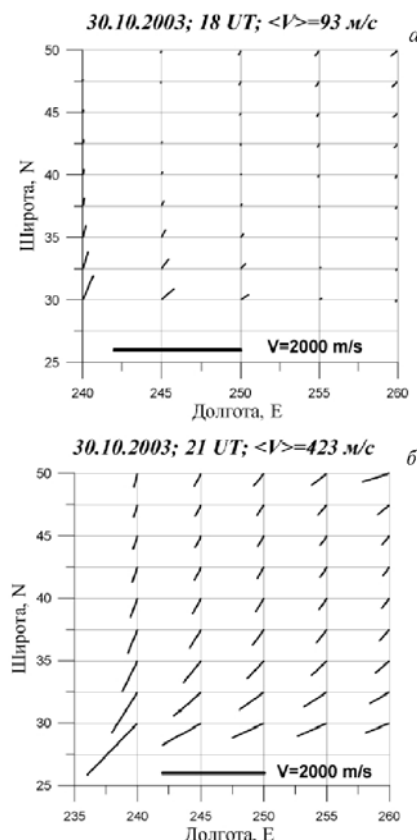


Рис. 2. Карты поля скоростей перемещения изолиний ПЭС 30 октября 2003 г., Северная Америка.

Разработанный нами метод позволяет получить количественные характеристики динамики развития магнитной бури. На рис. 2 представлены карты поля скоростей перемещения изолиний ПЭС; тонкими линиями отмечены границы элементарных ячеек карты ПЭС в стандарте файлов IONEX. Направление стрелочек соответствует азимуту α волнового вектора $\mathbf{K}$, а длина – модулю V фазовой скорости перемещения изолиний ПЭС, определенных с помощью процедур (1–3) для выбранных элементарных ячеек.

Поле скоростей рис. 2, а соответствует интервалу 18:00 UT, оно получено путем обработки по формулам (1–3) соседних интервалов (17:00 UT и 19:00 UT) GIM-карт (рис. 1, а, б). Как видно из рис. 2, а, максимальные значения скорости перемещения линий равного ПЭС в этот период не превышают 400 м/с при среднем значении 93 м/с.

Во время главной фазы бури ситуация меняется кардинально. Как видно из рис. 2, б, максимальные значения скорости перемещения линий равного ПЭС в этот период достигают уже 1500 м/с при среднем значении 423 м/с, а азимут α соответствует направлению на центр области с аномально высокой ионизацией. Эта картина иллюстрирует процесс аномального повышения ионизации в ограниченной области пространства за счет «обеднения» ионизации на обширной территории.

Заключение

Разработанная методика и программный пакет VELONEX могут быть использованы для построения глобального поля скоростей перемещения регу-

лярной составляющей ПЭС с целью решения динамических задач аэронавигации. Особый интерес представляет анализ баланса ионизации в ночной ионосфере Северного полушария, когда пополнение ионизации в неосвещенной части ионосферы осуществляется за счет переноса плазмы по магнитным силовым линиям из освещенной части ионосферы Южного полушария. Другое важное применение возможно при анализе динамики экваториальной аномалии. При соответствующем временном разрешении карт IONEX (не хуже 15 мин) с использованием процедуры нормировки к фоновым условиям метод будет полезен для детального исследования в глобальном масштабе крупномасштабных волновых процессов, генерируемых в авроральной зоне во время возмущений; во время солнечных затмений при перемещении лунной тени вдоль земной поверхности со сверхзвуковой скоростью; при извержении вулканов, а также для детектирования мощных искусственных воздействий на атмосферу Земли.

Эта работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 03-05-64100, 05-05-64634), а также гранта N НШ-272.2003.5 государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N. et al. (1998) A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements. *Radio Sci.* V. 33. P. 565–582.
2. Ho C.M., Mannucci A.J., Lindqwister U.J., Pi X., Tsurutani B.T. Global ionosphere perturbations monitored by the worldwide GPS network // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 23. P. 3219–3222.
3. Afraimovich E.L., Boitman O.N., Zhovty E.I., Kalikhman A.D., Pirog T.G. Dynamics and anisotropy of traveling ionospheric disturbances as deduced from transionospheric sounding data // *Radio Sci.* V. 34. P. 477–487.

Институт солнечно-земной физики СО РАН