

Исследование вариаций электронной концентрации в F- слое полярной ионосферы, обусловленных сменой знака V_y – компоненты межпланетного магнитного поля

Т.Н. Ларина¹, Г.М. Глебова²

Донской государственной технической университет¹,

Южный федеральный университет²

Аннотация: Проведено исследование динамики крупномасштабных структур полярной области F-2, обусловленных сменой знака V_y -компоненты межпланетного магнитного поля. Показано, что одной из причин нестационарных вариаций структуры ионосферы в полярных шапках могут служить быстрые вариации V_y -компоненты ММП. Время переброски языка ионизации с утра на вечер составляет $3 \cdot 10^3$ с. Этот процесс сопровождается расслоением языка ионизации и образованием крупномасштабных пятен ионизации, распадающихся с течением времени.

Ключевые слова: полярная ионосфера, конвекция, электронная концентрация, межпланетное магнитное поле, гелиогеофизические условия, ионосферные возмущения, полярная шапка, V_y – компонента ММП, F-слой.

Решение основных проблем радиосвязи и радионавигации связано с необходимостью изучения структуры полярной ионосферы в различных гелиогеофизических условиях в рамках одной глобальной модели. Для этого необходимы достоверные модели нейтральной атмосферы, электрических и магнитных полей, а также знание температурного режима как нейтральной, так и ионизированной, составляющих [1, 2]. К настоящему моменту существует ряд моделей полярной ионосферы, используемых в качестве исследовательского и прогностического аппарата F-области ионосферы [3, 4 и др.].

Целью настоящих исследований является попытка оценить эффекты нестационарного перераспределения ионизации в F-слое ионосферы внутри полярных шапок, обусловленные сменой знака V_y -компоненты ММП и связанной с ней конвекцией.

Результаты настоящих исследований, являются продолжением более ранних работ [5-9], где процессы моделирования крупномасштабных структур полярной ионосферы рассматривались в приближении стационарной конвекции. В работе [9] было показано, что быстрые глобальные вариации концентрации в полярных шапках взаимосвязаны с вариациями знака V_y -компоненты ММП. В этой модели для условий полярной ионосферы методом Лагранжа решалось конвективно-диффузионное уравнение непрерывности для иона $[O^+]$ вида:

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} + (\vec{V}_1 \nabla) N_i + \text{div}(N_i \vec{V}_2) = q_i - L_i - N_i \text{div} \vec{V}_1, \quad (1)$$

где: N_i – концентрация ионов $[O^+]$; \vec{V}_1 – скорость конвективного переноса плазмы, поперечная к геомагнитному полю; \vec{V}_2 – продольная по отношению к геомагнитному полю скорость диффузии ионов; q_i – скорость образования ионов $[O^+]$; L_i – скорость рекомбинации ионов $[O^+]$.

Различие в пространственных распределениях электронной концентрации в условиях стационарной конвекции обусловлено изменением знака V_y -компоненты ММП и связанным с ней изменением направления вращения ДРУ вихря конвекции, сосредоточенного внутри полярной шапки. Поэтому при $V_y > 0$ плазма из освещенной Солнцем области, переносилась в утренний сектор, а при $V_y < 0$ в вечерний. В результате такого переноса в этих секторах формировался язык ионизации, имеющий асимметрию относительно линии полдень-полночь.

В данной работе рассматривается временная картина переброски ионизации с одной стороны полярной шапки на другую при смене знака V_y ММП. Для этого решается следующая нестационарная задача. В начальный момент времени $t=0$ ионосфера находится в стационарном состоянии при

положительном значении V_y ММП. Конвекция, соответствующая начальному состоянию аналогична конвекции в работе [9]. Она состоит из двухвихревой конвекции типа ДР2 и асимметричного вихря ДРУ рис.1а.

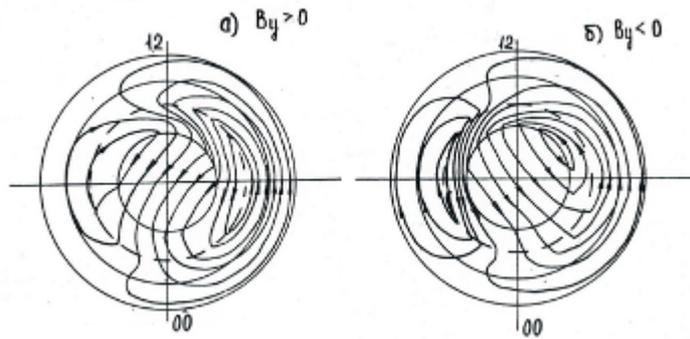


Рис. 1. – Структуры конвекции с учетом коротации при различных знаках V_y -компоненты ММП.

Аналитически потенциал моды ДР2 Φ_p выражается в виде:

$$\Phi_p = \frac{U_p}{2} \left\{ \begin{array}{ll} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \operatorname{ctg} \frac{\theta_p}{2} \sin \Lambda, & \theta \leq \theta_p, \\ \frac{\operatorname{tg} \frac{\theta_a}{2} \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} - \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \operatorname{ctg} \frac{\theta_a}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\theta_a}{2} \operatorname{ctg} \frac{\theta_p}{2} - \operatorname{tg} \frac{\theta_p}{2} \operatorname{ctg} \frac{\theta_a}{2}} \sin \Lambda, & \theta_p \leq \theta \leq \theta_a \\ 0, & \theta \geq \theta_a \end{array} \right\}, \quad (3)$$

где: θ – коширота, Λ – азимутальный угол с отсчетом от полуночного меридиана, θ_p, θ_a – полярная и экваториальная граница аврорального овала.

Потенциал асимметричного вихря Φ_c , определяемый V_y -компонентой ММП и сосредоточенный внутри полярной шапки с фокусом на полуденном меридиане при $\theta = \theta_c$, имеет вид:

$$\Phi_c = \frac{U_c}{2} \left\{ \begin{array}{ll} 1 - \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \operatorname{ctg} \frac{\theta_c}{2} \sin \Lambda, & \theta \leq \theta_c \\ \frac{\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \operatorname{ctg} \frac{\theta_p}{2} - \operatorname{tg} \frac{\theta_p}{2} \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\theta_c}{2} \operatorname{ctg} \frac{\theta_p}{2} - \operatorname{tg} \frac{\theta_p}{2} \operatorname{ctg} \frac{\theta_c}{2}} \sin \Lambda, & \theta_c \leq \theta \leq \theta_p \\ 0, & \theta \geq \theta_p \end{array} \right\}. \quad (4)$$

В расчетах используется модель функции ионообразования выпадающими частицами, структура которой представлена в [8,9], кроме того не учитывается смещение геомагнитного полюса относительно географического в зависимости от времени UT .

На следующем этапе V_y – компонента ММП скачкообразно меняет свой знак, становясь отрицательной. Структура конвекции, соответствующая этому изменению, представлена на рис. 1б. Метод моделирования нестационарных распределений электронной концентрации, используемый нами, изложен в работах [4, 10, 11]. Он состоит из двух этапов. На первом этапе определяется начальная пространственная старт-точка и соответствующее ей стационарное распределение электронной концентрации. Для этого уравнения движения интегрируются «назад» с отрицательным шагом по времени ($dt < 0$) от рассматриваемой точки в течение времени t . На втором этапе уравнение непрерывности (1) интегрируется «вперед» ($dt > 0$) с восстановлением нужного направления скорости конвекции до рассматриваемого момента времени t . В результате этого определяется искомый профиль концентрации. Расчеты, проводились для северной полярной шапки при следующих значениях параметров: $U_p = 40$ кВ, $U_c = (-sign B_y) 20$ кВ, $\theta_a = 25^\circ$, $\theta_p = 15^\circ$, $\theta_c = 10^\circ$. Это соответствует умеренному уровню возмущенности. Гелиогеофизические условия, для которых проводились расчеты распределений электронной концентрации, соответствуют зимним условиям, $\delta = -22^\circ$, с температурой экзосферы $T_{\infty} = 1000$ К. Применяются верхние граничные условия типа «полярного ветра», для которых концентрация атомов водорода на высоте 500 км $[n] = 2.7 \cdot 10^4$ см⁻³. В модели учитываются как солнечное УФ-

излучение, так и достаточно слабое ионообразование, создаваемое высыпавшимися электронами.

На рис. 2а-ж показана динамика пространственных структур ионосферной плазмы в полярной шапке на высоте $h=300$ км в различные промежутки времени при скачкообразном изменении знака V_y -ММП, соответствующее изменению системы конвекции со структуры на рис.1а на структуру, представленную на рис.1б вдоль меридиана ($06^h - 18^h$ MLT). Стационарное распределение электронной концентрации, в начальный момент времени представлено на рис. 2а и для приблизительно таких же условий в работе [9]. Конечное стационарное распределение плазмы, соответствующее V_y ММП < 0 изображено на рисунке 2ж и в работе [9]. После скачкообразного изменения конвекции распределение электронной плазмы начинает довольно быстро меняться. Через 25-30 минут на вечерней стороне меридиана ($06^h - 18^h$ MLT) около края полярной шапки формируется пик электронной концентрации, который далее увеличивается и расширяется (рис. 2 г-ж). Это соответствует обычной переброске языка ионизации с утренней стороны полярной шапки на вечернюю. Через 90 минут после смены знака V_y -компоненты ММП распределение электронной концентрации на меридиане ($06^h - 18^h$ MLT) в вечернем секторе ионосферы близко к конечному стационарному состоянию.

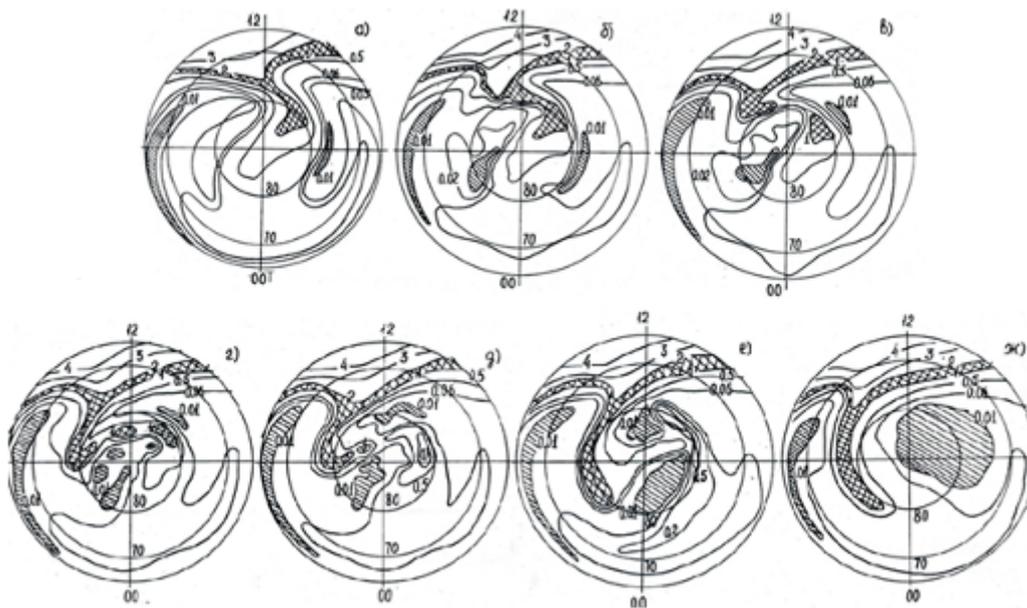


Рис. 2 а-ж. Структура ионосферы на высоте 300 км в начальном состоянии (а), через 15 минут (б) и 25 минут (в) через 45 минут (г), 60 минут(д), 90 минут (е) и в установившемся режиме (ж) после смены знака V_y -компоненты ММП.

На утренней стороне в области, где в конечном стационарном состоянии сформируется широкая утренняя полость, значения электронной концентрации существенно отличаются от стационарных. Это объясняется тем, что изменение электронной концентрации на вечерней стороне шапки происходит быстро, так как, в основном, определяется быстрым конвективным переносом плазмы, а полость на утренней стороне шапки определяется более медленным рекомбинационным распадом «старого» языка ионизации. В результате временами возможно существование двух языков ионизации. Процесс распада старого языка ионизации приводит к появлению через 25 минут после смены структуры конвекции среднемасштабных островков повышенной ионизации т.е. к существованию пятен ионизации на перемычке между старым и новым языками в течение 60 минут после смены знака V_y -компоненты ММП. Сама же перемычка ионизации между языками становится тоньше и сдвигаясь к полюсу с течением времени распадается. Более детально картина нестационарной перестройки ионизации в полярной

шапке отражена на рисунках 3, где представлены горизонтальные сечения ионосферы на высоте $h=300$ км для рассматриваемых выше случаев. Эти рисунки демонстрируют переходные распределения электронной концентрации в полярном F-слое в течение первых 90 минут после смены знака V_y -компоненты ММП.

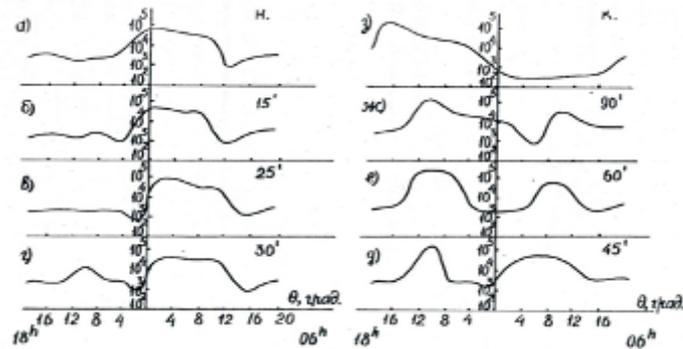


Рис. 3а-з. Сечение ионосферы на высоте $h=300$ км вдоль меридиана утро-вечер ($06^h - 18^h$ MLT) через различные интервалы времени после смены знака V_y ММП с «+» на «-».

Следует отметить что экспериментальные наблюдения F-слоя ионосферы в ночной полярной шапке в Туле (Гренландия), полученные при зондировании ионосферы с помощью цифрового ионозонда и наземные оптические измерения [12] показывают наличие крупномасштабных (800-1000 км) плазменных пятен, которые движутся в антисолнечном направлении в периоды умеренных возмущений. Одновременные измерения при помощи спутника Dynamics Explorer показывают, что эти пятна с наибольшей концентрацией $[n]=10^6 \text{ см}^{-3}$ нельзя объяснить локальным внедрением частиц, так как по спутниковым измерениям внедрение частиц по всей полярной шапке однородно. Пятна образуются вблизи или на экваториальной стороне дневной авроральной зоны и конвектируют в направлении от солнца через полярную шапку. Результаты численного моделирования нестационарной перестройки полярной F-области ионосферы на высоте 300 км в двумерном приближении и без учета ионизации высыпающимися частицами,

представленные в [11], демонстрируют, в общем, аналогичные результаты. Поэтому можно предположить, что одной из причин появления пятен ионизации может быть (при достаточно слабом уровне ионизации высыпающимися частицами) нестационарная перестройка ионосферы, обусловленная изменениями V_y -компоненты ММП.

Еще одной особенностью динамики картины пространственных распределений электронной концентрации в F-слое при смене знака V_y -компоненты ММП является динамика утренней и вечерней полостей. Такие распределения могут наблюдаться при очень слабой ионизации высыпающимися энергичными частицами. Движение утренней и вечерней полостей приводит к тому, что через 45 минут после смены системы конвекции концентрация в районе полярной шапки падает от $2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ до 10^3 см^{-3} , а через 60–90 минут после смены конвекции в полярной шапке вдоль меридиана полдень-полночь наблюдается двухполостная структура, разделенная узкой перемычкой повышенных значений электронной концентрации. Сами полости также неоднородны. Далее старый язык ионизации и его перемычка с новым языком ионизации распадаются, а полости сливаются в одну большую утреннюю дыру ионизации.

Очевидно, что переходные состояния ионизации F-области ионосферы значительно отличаются от стационарных, поэтому при прогнозировании распределений электронной концентрации в течение первых 2-х часов после смены знака V_y – компоненты ММП необходимо использовать нестационарный подход.

Литература

1. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Кривошеев Н.В., Ларина Т.Н., Резников А.Е. Результаты расчета высотного профиля температуры электронов в области E ионосферы Земли // Инженерный вестник Дона, 2017, №3 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3_y2017/4370/.

2. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Кривошеев Н.В., Ларина Т.Н., Музыка Т.Н., Резников А.Е. Температура электронов в спорадическом слое E ионосферы Земли// Инженерный вестник Дона 2018, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4701/.
 3. Намгаладзе А.А., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В., Карпов И.В., Бессараб Ф.С., Суроткин В.А., Глущенко Т.А., Наумова Н.М. Глобальная численная модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли// Геомагнетизм и аэрономия. 1990.30, №4, С.612-619.
 4. Уваров В.М., Лукьянова Р.Ю. Моделирование высокоширотной ионосферы с учетом влияния параметров межпланетной среды// Гелиогеофизические исследования. 2014. вып.7. С.108-118.
 5. Можаяев А.М. О моделировании влияния магнитосферной конвекции на пространственную структуру ионосферы высоких широт//В сб. Динамика и моделирование ионосферных возмущений. 1978. М.: Наука. С.97-102.
 6. Watkins B.J. A numerical computer investigation of the polar F-region ionosphere. Planet. Space Sci. 1978. 26, №6, pp. 559-569.
 7. Sojka J.J., Raitt W.J., Shunk R.W. Plasma density feaytre associated with strong convection in the winter high-latitude F-region. J.Geophys.Res. 1981. 86, №8, pp. 6968-6976.
 8. Ларина Т.Н., Максимова Н.М., Можаяев А.М., Чернышева С.П. Математическая модель одноионной конвектирующей полярной ионосферы// Phys. Solariterr. Potsdam. 1982. №18, С.47-70.
 9. Гальперин Ю.И., Зосимова А.Г., Ларина Т.Н., Можаяев А.М., Осипов Н.К., Пономарев Ю.Н. Изменения в структуре F-слоя полярной ионосферы при смене знака Y-компоненты межпланетного магнитного поля. Эффект Свальгарда-Мансурова в ионосфере // Космические исследования. 1980. 18, №6, С.877-898.
-

10. Ларина Т.Н. Можяев А.М., Пономарев Ю.Н., Власков Г.А. О моделировании нестационарно-конвектирующего F-слоя полярной ионосферы. Динамика ионосферного провала в предварительную фазу суббури // Препринт ИКИ АН СССР. 1986. №1132,26с.
11. Власков, Г. А. Типовые возмущения и флуктуации магнитосферной конвекции и их влияние на характер глобального распределения электронной концентрации в F-области полярной ионосферы // Дис. канд. физ.-мат. наук. 1991. М: ИЗМИРАН. 123 с.
12. Weber E.J., Burchan J., Moore J.G., Sharber J.R. < Livingston R.C., Winingham J.D., Reinisch B.W. F-layer ionization patches in the polar cap. J. Geophys. Res. 1984. A89, №3, pp. 1683-1694.

References

1. Volkomirskaya L.B., Gulevich O.A., Krivosheev N.V., Larina T.N., Reznikov A.E. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3_y2017/4370/.
 2. Volkomirskaya L.B., Gulevich O.A., Krivosheev N.V., Larina T.N., Reznikov A.E. Inženernyj vestnik Dona 2018, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4701/.
 3. Namgaladze A.A., Koren'kov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Bessarab F.S., Surotkin V.A., Glushhenko T.A., Naumova N.M. Geomagnetizm i aeronomiya. 1990.30, №4, pp.612-619.
 4. Uvarov V.M., Luk'yanova R.Yu. Geliogeofizicheskie issledovaniya. 2014. vy`p.7. pp.108-118.
 5. Mozhaev A.M. V sb. Dinamika i modelirovanie ionosfery`x vozmushhenij. 1978. M.: Nauka. pp. 97-102.
 6. Watkins B.J. Planet. Space Sci. 1978. 26, №6, p.p. 559-569.
 7. Sojka J.J., Raitt W.J., Shunk R.W. J.Geophys.Res. 1981. 86, №8, pp. 6968-6976.
-



8. Larina T.N., Maksimova N.M., Mozhaev A.M., Cherny`sheva S.P. Phys. Solariterr. Potsdam. 1982. №18, pp.47-70.
9. Gal`perin Yu.I., Zosimova A.G., Larina T.N., Mozhaev A.M., Osipov N.K., Ponomarev Yu.N. Kosmicheskie issledovaniya. 1980. 18, №6, pp.877-898.
10. Larina T.N. Mozhaev A.M., Ponomarev Yu.N. Vlaskov G.A. Preprint IKI AN SSSR. 1986. №1132, 26 p.
11. Vlaskov, G. A. Tipovye vozmushcheniya i fluktuacii magnitosfernoj konvekcii i ih vliyanie na harakter global'nogo raspredeleniya ehlektronnoj koncentracii v F-oblasti polyarnoj ionosfery [Typical perturbations and fluctuations of the magnetospheric convection and their influence on the global distribution of the electron concentration in the F region of the polar ionosphere]. Dis. kand. fiz-mat. nauk. 1991. M: IZMIR AN. 123 p.
12. Weber E.J., Burchan J., Moore J.G., Sharber J.R., Livingston R.C., Winingham J.D., Reinisch B.W. Gophys. Res. 1984. A89, №3, pp. 1683-1694.