

УДК 523.75

Электрические потенциалы и поля в плазменных слоях Солнца, обусловленные неоднородностью его вращения

В.М. Ефименко¹, В.В. Токий²

¹ Астрономическая обсерватория КНУ им. Т. Шевченко, 04053, ул. Обсерваторная, 3, Киев-53, Украина
efim@observ.univ.kiev.ua

² Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАНУ, Донецк
ntv.1976@mail.ru

Поступила в редакцию 23 октября 2009 г.

Аннотация. Рассмотрены изменения параметров плазменных слоев солнечной атмосферы с расстоянием от поверхности Солнца. Учтено дипольное приближение для общего магнитного поля и неоднородность вращения Солнца. Выполнены оценки электрических полей в солнечной короне, которые вызываются различными физическими механизмами: электрическими полями, полями, вызванными приливными силами и индукционными полями, обусловленными неоднородностью вращения Солнца. Показано, что индукционные электрические поля в солнечной короне многократно превышают поля, вызванные другими механизмами.

ELECTRIC POTENTIALS AND FIELDS IN PLASMA LAYERS OF THE SUN, CAUSED BY HETEROGENEITY OF ITS ROTATIONS, *by V.M. Efimenko, V.V. Tokiy.* In the present paper, the changes of parameters near-surface plasma layers of a solar atmosphere with distance from the Sun surface the dipole approximation for the general magnetic field and heterogeneity of the Sun rotation are considered. Estimations of electric fields in a solar corona that are caused by various physical mechanisms: polarizing electric fields, fields caused by tidal forces and the induction electric fields caused by heterogeneity of rotation of the Sun are executed. It is shown that induction electric fields in a solar corona on some usages exceed the fields caused by other mechanisms.

Ключевые слова: индукционные явления, тахоклин, плазменный слой, лучистая зона, конвективная зона, солнечная корона

Индукционные явления (Тамм, 2003) однородно намагниченной и однородно вращающейся звезды в вакууме впервые рассматривались Дэвисом (Дэвис, 1947) при расчете радиальных и меридиональных электростатических полей и потенциалов окружающего звезду пространства.

В настоящей работе, в отличие от (Дэвис, 1947), при рассмотрении электромагнитных явлений учтена неоднородность вращения (тахоклин) однородно намагниченного Солнца и наличие внешних плазменных слоев (атмосферы и короны). Как отмечалось в (Пакс, 2004), при идеальном магнитогидродинамическом рассмотрении с бесконечной проводимостью электродвижущие силы не индуцируются (Паркер, 1996). Поэтому здесь учтена конечность удельной электрической проводимости плазменных слоев Солнца, его атмосферы и короны. Сделаны также оценки величин электрических полей, вызванных различными физическими механизмами – поляризационных, приливных, индукционных.

Так как и Дэвис (Дэвис, 1947) общее магнитное поле Солнца считаем дипольным. Принимаем, что ось диполя параллельна оси вращения Солнца. В области $r < a$ магнитная индукция B постоянна. В отличие от Дэвиса, считавшего, что вся сфера радиуса a вращается как твердое тело с угловой скоростью ω , мы учтем неоднородность вращения солнечных слоев. Считаем, что внутренняя часть ниже тахоклина (лучистая зона с ядром - L) вращается со скоростью ω_L , а внешняя (конвективная зона - Z, нижняя атмосфера - A и корона - C), при $r > a_L$, со скоростью ω_0 ($\omega_Z = \omega_A = \omega_C = \omega_0$). Для получения аналитических решений принимаем приближение изотермичности для каждого плазменного слоя. При проведении численных оценок по полученным выражениям принималось, что удельные электропроводности плазменных слоев удовлетворяют неравенствам $\lambda_A \ll \lambda_m, \lambda_C$. Так же как и в (Дэвис, 1947), мы принимали потенциал на бесконечности за ноль.

Для электрических потенциалов φ_i ($i = L, Z, A, C$) в покоящейся сферической системе координат имеем уравнение Пуассона

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \varphi_i}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \varphi_i}{\partial \theta} \right) = \begin{cases} 2B_0 \omega_L, r < a_L < a; \\ 2B_0 \omega_0, a_L < r < a; \\ B_0 \omega_0 \frac{a^3}{r^3} (3 \cos^2 \theta - 1), r > a. \end{cases} \quad (1)$$

На границах между лучистой и конвективной зоной ($r = a_L$), конвективной зоной и фотосферой ($r = a$), на нижней границе короны ($r = a_C$) должны выполняться равенства потенциалов и радиальной компоненты тока. Уравнения (1) образуют полную систему дифференциальных уравнений для потенциалов с граничными условиями. В рамках настоящей модели получены аналитические решения для распределения потенциалов в плазменных слоях Солнца

$$\varphi_L(r, \theta) = \left[A + \frac{B}{a^5} - \frac{B_0 \omega_0}{3} - \frac{2B_0 (a^5 - a_L^5) (\omega_L - \omega_0)}{15a^5} \right] r^2 \frac{3 \cos^2 \theta - 1}{2} + \frac{B_0 a_L^2 (\omega_0 - \omega_L)}{3} + \frac{B_0 r^2 \omega_L}{3}, \quad (2)$$

$$\varphi_Z(r, \theta) = \left[\left(A + \frac{B}{a^5} - \frac{B_0 \omega_0}{3} + \frac{2B_0 a_L^5 (\omega_L - \omega_0)}{15a^5} \right) r^2 - \frac{2B_0 a_L^5 (\omega_L - \omega_0)}{15r^3} \right] \frac{3 \cos^2 \theta - 1}{2} + \frac{B_0 r^2 \omega_0}{3}, \quad (3)$$

$$\varphi_A(r, \theta) = \left(\frac{B}{r^3} + Ar^2 - \frac{B_0 a^3 \omega_0}{3r} \right) \frac{3 \cos^2 \theta - 1}{2} + \frac{B_0 a^3 \omega_0}{3r}, \quad (4)$$

$$\varphi_C(r, \theta) = \left(\frac{C}{r^3} - \frac{B_0 a^3 \omega_0}{3r} \right) \frac{3 \cos^2 \theta - 1}{2} + \frac{B_0 a^3 \omega_0}{3r}, \quad (5)$$

где A, B и C – константы, B_0 – магнитное поле на полюсе, r – расстояние от центра Солнца, θ – полярный угол, отсчитываемый от оси вращения.

Полученное решение (5) переходит в выражения Дэвиса для электрического потенциала вне Солнца ($r > a$) при отсутствии тахоклина и внешних плазменных слоев ($\omega_L = \omega, \omega_0 = 0, a_L = a_C = a, \lambda_A = \lambda_C = 0$)

$$\varphi(r, \theta) = \left(-\frac{B_0 a^5 \omega}{3r^3} \right) \frac{3 \cos^2 \theta - 1}{2}. \quad (6)$$

Используя решения для потенциалов (2–5) аналитические выражения для электрических полей можно определить по формулам (Тамм, 2003):

$$E_r^i(r, \theta) = -\frac{\partial \varphi_i}{\partial r}, \quad E_\theta^i(r, \theta) = -\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_i}{\partial \theta}. \quad (7)$$

Так, например, радиальная компонента электрического поля в короне имеет вид:

$$E_r^c(r, \theta) = \left(\frac{3C}{r^4} - \frac{B_0 a^3 \omega_0}{3r^2} \right) \frac{3 \cos^2 \theta - 1}{2} + \frac{B_0 a^3 \omega_0}{3r^2}. \quad (8)$$

Меридиональная компонента электрического поля в короне:

$$E_\theta^c(r, \theta) = \left(\frac{C}{r^4} - \frac{B_0 a^3 \omega_0}{3r^2} \right) \frac{3 \sin 2\theta}{2}. \quad (9)$$

Аналитические выражения (8) и (9) переходят в выражения Дэвиса для электрического поля вне Солнца ($r > a$) при отсутствии тахоклина и внешних плазменных слоев ($\omega_L = \omega$, $\omega_\theta = \theta$, $a_L = a_C = a$, $\lambda_A = \lambda_C = \theta$).

$$E_r(r, \theta) = \left(-\frac{B_0 a^5 \omega}{r^4} \right) \frac{3 \cos^2 \theta - 1}{2}, \quad E_\theta(r, \theta) = \left(-\frac{B_0 a^5 \omega}{r^4} \right) \frac{\sin 2\theta}{2} \quad (10)$$

Выполним оценки радиальных электрических полей:

- поляризационное электрическое поле в основании солнечной короны – $2.84 \cdot 10^{-6}$ v/m (Ефименко и др., 2004);
- электрическое поле, обусловленное приливными силами планет – $2.4 \cdot 10^{-13}$ v/m (Ефименко и др., 2007);
- индукционное электрическое поле в основании солнечной короны на экваторе – $2.18 \cdot 10^{-2}$ v/m.

Выводы

1. Получены аналитические решения для распределения электрических потенциалов и полей в плазменных слоях Солнца, обусловленных неоднородностью его вращения.
2. При отсутствии тахоклина и внешних плазменных слоев ($\omega_L = \omega$, $\omega_\theta = \theta$, $a_L = a_C = a$, $\lambda_A = \lambda_C = \theta$) решения для распределения потенциала и электрических полей вне Солнца совпадают с решениями Дэвиса (Дэвис, 1947).
3. Индукционные электрические поля, обусловленные неоднородностью вращения Солнца, на несколько порядков превышают радиальные поляризационные поля и на много порядков превышают поля, обусловленные приливными силами планет.

Литература

- Дэвис (Davis L.Jr.) // Phys. Rev. 1947. V. 72. №. 7. P. 632.
 Пакс (Parks G.K.) // Space Sci. Rev. 2004. V. 113. P. 97.
 Паркер (Parker E.N.) // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. №. 10. P. 587.
 Тамм И.Е. // Основы теории электричества. М.: 2003.
 Ефименко В.М, Токий В.В., Токий Н.В. // Кинем. и физ. небесн. тел. 2004. Т. 20. №. 1. С. 27.
 Ефименко В.М, Токий В.В., Токий Н.В. // Изв. Крым. Астрофиз. Обсерв. 2007. Т. 103. №. 4. С. 51.