

УДК 523.947, 523.755+525.7

В. В. Токий¹, В. М. Ефименко², Н. В. Токий¹¹Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина НАН Украины, Донецк, ntvl976@mail.ru²Научно-исследовательская лаборатория «Астрономическая обсерватория» Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, efim@observ.univ.kiev.ua

Возмущения, вызванные горизонтальными приливными силами в экваториальной плоскости солнечной короны

Представлено 25.06.07

Розглянуто вплив гравітаційного збурення, викликаного рухом планет і обертання Сонця, на зміни складових загального магнітного поля корони в рамках моделі Вебера і Девіса. Використано стаціонарну модель сонячного вітру в екваторіальній площині, яка враховує ефекти градієнтів тиску, тяжіння і магнітних сил для радіальних і для азимутальних рухів. В'язкість не враховувалась, а електрична провідність вважалась нескінченною. Досліджено періодичні півдобові розв'язки з урахуванням гравітаційних і магнітних полів для збурень, викликаних планетами. Отримано аналітичні залежності збурень радіальної і азимутальної складових магнітного поля в екваторіальній площині сонячної корони від часу, відстані до центра Сонця, геліографічної довготи, швидкості сонячного вітру і характеристик планети.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение влияния планет на циклы солнечной активности потребовало вычисления приливной силы [1] и определения высот приливов на Солнце [2]. Полученные результаты не вдохновляли на продолжение этих исследований, так как добавка к гравитационной силе за счет всех приливных сил, обусловленных всеми планетами, не превышала $5 \cdot 10^{-10}$ % от силы притяжения Солнца, а предсказываемая высота прилива не составляла и $3 \cdot 10^{-10}$ % от радиуса Солнца a , что соответствует приливам порядка миллиметров. При этом не учитывалось, что в отличие от океанов на Земле солнечная корона является плазмой. В работе [3] описано влияние гравитационного возмущения на изменения параметров плазменного слоя при действии горизонтальных приливных сил, нарушающих сферическую симметричность и стационарность, но без учета магнитных полей. Первой моделью коронального расширения, в которой учитывалась магнитная сила, была одножидкостная политропная модель, сформулированная Вебером и Дэвисом [4]. В их работе магнитное поле у основания короны считалось монопольным. Такое задание поля не адекватно реальности, но лишь оно совместимо с точными решениями для сферически-симметричного стационарного расширения короны [5]. Поэтому цель настоящей работы состояла в том, чтобы

описать влияние гравитационного возмущения, обусловленного движением планет и вращением Солнца, на изменения компонентов общего электромагнитного поля короны и скорости солнечного ветра в рамках модели Вебера и Дэвиса.

МОДЕЛЬ ВЕБЕРА — ДЭВИСА ДЛЯ СТАЦИОНАРНОГО РАСШИРЕНИЯ

В невозмущенной приливными силами задаче рассматривалось взаимодействие между идеально проводящим солнечным ветром и магнитным полем. Предполагалось, что компоненты вектора магнитного поля и скорости плазмы в сферической системе координат в экваториальной плоскости имеют радиальную и азимутальную составляющие и зависят только от расстояния до центра Солнца. Топология решений [4] для радиальной составляющей уравнения движения показала, что решение для солнечного ветра u должно непрерывно проходить через три критические точки. После паркеровской критической точки, связанной со скоростью звука

$$u_c = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

на расстоянии $r_c = \frac{GMm}{4kT}$, радиальная составляющая солнечного ветра u должна достигнуть альве-

новской скорости

$$u_i = \sqrt{\frac{B_r^2 + B_\varphi^2}{\mu\rho}},$$

а перед ней на альвеновском радиусе r_A — радиальной альвеновской скорости

$$u_A = \sqrt{\frac{B_r^2}{\mu\rho}}.$$

Здесь G — гравитационная постоянная, M — масса Солнца, k — константа Больцмана, T — температура, $\rho = mn$ — плотность, m — масса протона, n — концентрация.

В этом случае из уравнения $\text{div}\bar{B} = 0$ следует, что радиальная составляющая магнитного поля падает с расстоянием по квадратичному закону

$$B_r = B_0 \frac{a^2}{r^2},$$

где B_0 — напряженность поля на поверхности Солнца ($r = a$).

Азимутальная составляющая магнитного поля определяется выражением

$$B_\varphi = -B_r \Omega \cdot r \frac{r_A^2 - r^2}{u_A r_A^2 - ur^2}.$$

Азимутальная составляющая солнечного ветра равна

$$V_\varphi = \Omega \cdot r \frac{r_A^2(u_A - u)}{u_A r_A^2 - ur^2}.$$

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ЗАДАЧИ

Настоящая работа основана на простейших предположениях. Будем рассматривать тонкий изотермический слой идеально проводящей среды в экваториальной плоскости солнечной короны толщиной h на расстоянии r от центра Солнца ($h \ll r$).

Пусть Ω — угловая скорость вращения Солнца, t — время, e — заряд электрона, φ — гелиографическая долгота, θ — дополнение к гелиографической широте точки, δ_j — гелиоцентрическое склонение j -й планеты, δu , δV_φ — компоненты скорости частиц, δE_θ — меридиональная составляющая электрического поля, δg_φ — азимутальная составляющая горизонтального приливного ускорения.

Принимаем, что при действии горизонтальных приливных сил изменения концентрации δn и скорости δu , δV_φ частиц будут малыми. Для определения изменений в рамках изотермического приближения мы воспользуемся линейной системой гидродинамических уравнений, включая уравнение непрерывности, движения, и уравнений Максвелла.

Из закона Ома для идеально проводящей среды получим выражение

$$\delta E_\theta = -\delta u B_\varphi - \delta B_\varphi u + \delta V_\varphi B_r + \delta B_r V_\varphi; \quad (1)$$

из радиальной составляющей уравнения индукции —

$$-\frac{\partial \delta B_r}{\partial t} - \frac{B_r}{r} \frac{\partial \delta V_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{B_\varphi}{r} \frac{\partial \delta u}{\partial \varphi} + \frac{u}{r} \frac{\partial \delta B_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial \delta B_r}{\partial \varphi} = 0; \quad (2)$$

из азимутальной составляющей уравнения индукции —

$$-\frac{\partial \delta B_\varphi}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rV_\varphi)}{\partial r} \delta B_r - \frac{1}{r} \frac{\partial(ru)}{\partial r} \delta B_\varphi + \frac{1}{r} \frac{\partial(rB_r)}{\partial r} \delta V_\varphi - \frac{1}{r} \frac{\partial(rB_\varphi)}{\partial r} \delta u = 0. \quad (3)$$

Из уравнения $\text{div}(\bar{B} + \delta\bar{B}) = 0$ следует, что

$$2\delta B_r + \frac{\partial \delta B_\varphi}{\partial \varphi} = 0. \quad (4)$$

Уравнение непрерывности запишется в виде

$$\frac{\partial \delta n}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 u)}{\partial r} \delta n + \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 n)}{\partial r} \delta u + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial \delta n}{\partial \varphi} + \frac{n}{r} \frac{\partial \delta V_\varphi}{\partial \varphi} = 0. \quad (5)$$

Азимутальная составляющая уравнения движения равна

$$\frac{\partial \delta V_\varphi}{\partial t} + \left[\frac{1}{r} \frac{\partial(rV_\varphi)}{\partial r} \delta u + \frac{u}{r} \delta V_\varphi + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial \delta V_\varphi}{\partial r} \right] + \frac{2kT}{\mu r} \frac{\partial \delta n}{\partial \varphi} + \frac{B_r}{\mu r \rho} \frac{\partial \delta B_r}{\partial \varphi} - \frac{1}{\mu r \rho} \frac{\partial(rB_\varphi)}{\partial r} \delta B_r - \frac{B_r}{\mu r \rho} \delta B_\varphi = \delta g_\varphi. \quad (6)$$

В системе уравнений (1)–(6) введены обозначения

$$\delta g_\varphi = \frac{3G}{2} \frac{M_j}{R_{sj}^2} r [\cos^2 \delta_j \sin [2(\Omega t - \varphi)]], \quad (7)$$

полученные из горизонтальной приливной силы [1]

$$\delta F_h = \frac{3}{2} GmM_j \frac{r}{R_{sj}^3} \sin 2\alpha_j, \quad (8)$$

где M_j — масса j -й планеты, R_{sj} — расстояние от центра Солнца до j -й планеты, α — угол между R_{sj} и g . За начальный момент времени принят момент прохождения круга склонений планеты через Кэррингтоновский меридиан. Уравнения (1)–(6) настолько просты, что они могут быть проинтегрированы аналитически.

Амплитуды полусуточных изменений меридионального электрического поля и солнечного ветра в экваториальной плоскости солнечной короны, вызванные планетами на расстоянии критического радиуса Альвена r_A

Планета	Масса	Расстояние	δE_{θ} - пВ/км		$\frac{\delta u_{\max} - \delta u_{\min}}{u_f - u_A} \Big _{r=r_A} \cdot 100, \%$
			Без учета магнитного поля	С учетом магнитного поля $B_0 = 1$ Гс	
Меркурий	0.0556	0.3871	0.012	36	0.001976
Венера	0.8172	0.7233	0.028	80	0.004453
Земля	1.000	1.0000	0.013	37	0.002062
Марс	0.108	1.5237	0.0004	1	0.00006294
Юпитер	318.4	5.2024	0.029	84	0.004662
Сатурн	95.22	9.5728	0.001	4	0.0002238
Уран	14.58	19.135	0.00003	0.08	0.00000429
Нептун	17.264	29.968	0.000008	0.00002	0.000001323
Плутон	0.92	39.265	0.0000002	0.0006	0.00000003133
Σ_j			0.085	242	0.013

ПОЛУСУТОЧНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ

Получены аналитические зависимости установившихся полусуточных возмущений радиальных и азимутальных компонентов магнитного поля и солнечного ветра, а также меридионального компонента электрического поля в экваториальной плоскости солнечной короны от времени, расстояния до центра Солнца, гелиографической долготы, концентрации плазмы, скорости солнечного ветра и характеристик j -й планеты (массы, расстояния до Солнца и гелиоцентрического склонения). На расстоянии альвеновского радиуса, в пренебрежении небольшим сдвигом по фазе, они равны: для радиального и азимутального компонентов магнитного поля

$$\delta B_{rj} = - \frac{GM_j r_A^2 \Omega \cdot r_c}{4R_{sj}^3 u_c^2} B_j \cos^2 \delta_j \sin [2(\Omega \cdot t - \varphi)], \quad (9)$$

$$\delta B_{\varphi j} = - \frac{GM_j r_A^2}{6R_{sj}^3 u_c^2} B_j \cos^2 \delta_j \cos [2(\Omega \cdot t - \varphi)], \quad (10)$$

для радиального и азимутального компонентов солнечного ветра

$$\delta u_j = \frac{9GM_j r_A^2}{2R_{sj}^3 u_c^2} u_A \cos^2 \delta_j \cos [2(\Omega \cdot t - \varphi)], \quad (11)$$

$$\delta V_{\varphi j} = - \frac{5GM_j r_A^2}{12R_{sj}^3 u_c^2} V_{\varphi} \cos^2 \delta_j \cos [2(\Omega \cdot t - \varphi)], \quad (12)$$

для меридионального компонента электрического поля

$$\delta E_{\theta j} = - \frac{GM_j r_A^3 \Omega^2 r_c}{6R_{sj}^3 u_c^3} B_j \cos^2 \delta_j \sin [2(\Omega \cdot t - \varphi)]. \quad (13)$$

В таблице приведены относительные значения масс, средних расстояний от Солнца, относительно

Земли, максимальные склонения планет и амплитуды (пВ/км) полусуточных установившихся колебаний меридионального компонента электрического поля, вызванных планетами. Они рассчитаны по формуле (20) из работы [3] без учета магнитного поля в экваториальной плоскости солнечной короны на расстоянии альвеновского радиуса r_A . В соседней графе приведены те же амплитуды, рассчитанные по формуле (13) из настоящей работы, где для иллюстративных вычислений принималось $r_A = 20a$, $r_c = 1.7 \cdot 10^9$ м, $u_c = 200$ км/с. Сравнение показывает, что учет общего магнитного поля усиливает амплитуду приливных возмущений на несколько порядков (примерно в 3000 раз) по сравнению с результатами работы [3], в которых не учитывалось общее магнитное поле Солнца.

В последней графе приведено отношение разности максимальной и минимальной полусуточной радиальной скорости солнечного ветра к разности полной альвеновской скорости и радиальной Альвеновской скорости. Сравнение показывает, что в отличие от результатов [1, 2] возмущения радиальной скорости солнечного ветра, обусловленные приливными силами, на расстояниях, близких к альвеновскому радиусу r_A , могут дать заметный вклад в возникновение описанных Вебером и Дэвисом [4] «быстрых» и «медленных» волн направленных как обратно к поверхности Солнца, так и вовне.

Выводы

В рамках изотермического приближения модели Вебера и Дэвиса получена линеаризованная по возмущениям, вызванным горизонтальными приливными силами, система уравнений, включающая уравнения: непрерывности, движения и Максвелла.

Исследованы периодические полусуточные аналитические решения, принимающие во внимание и гравитационные, и магнитные поля, для возмущенных параметров электромагнитного поля и скорости солнечного ветра, вызванных планетами.

Численные оценки показывают, что учет общего магнитного поля усиливает амплитуду приливных возмущений меридионального электрического поля на несколько порядков (примерно в 3000 раз) по сравнению с решениями, в которых не учитывалось общее магнитное поле Солнца.

Возмущения радиальной скорости солнечного ветра, обусловленные приливными силами, на расстояниях, близких к альвеновскому радиусу r_A , могут дать заметный вклад в волновые магнитогидродинамические процессы солнечной короны.

Для приближения нашей модели к реальности необходимо учесть вязкость, дипольный характер магнитного поля, нелинейные эффекты, другие ионы, инерциальные свойства электронов, что потребует увеличения количества дифференциальных уравнений и, в частности, замены условия электрической квазинейтральности плазмы уравнениями Максвелла.

1. Токий В. В., Ефименко В. М., Токий Н. В. Электрические поля, вызванные горизонтальными приливными силами в плазменных слоях атмосфер планет и звезд // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—2006.—103.—С. 51—59.

2. Хундхаузен А. Расширение короны и солнечный ветер. — М.: Мир, 1976.—302 с.
3. Takahashi Kozo. On the relation between the solar activity cycle and the solar tidal force induced by the planets // *Solar Phys.*—1968.— 3.—P. 598—602.
4. Trellis M. Michel. Marées solaires d'origine planétaire // *C. R. Acad. Sc. Paris.*—1966.—262.—P. B221—B224.
5. Weber E. J., Davis L. The angular momentum of the solar wind // *Astrophys. J.*—1967.—148.—P. 217—227.

DISTURBANCES CAUSED BY HORIZONTAL TIDAL FORCES IN THE EQUATORIAL PLANE OF THE SOLAR CORONA

V. V. Tokiy, V. M. Efimenko, N. V. Tokiy

The influence of the gravitational disturbance caused by motions of planets and the Sun's rotation, on the changes in the components of the general magnetic field of the solar corona within the framework of the Weber and Davis model is considered. The steady-state model of the solar-wind flow in the equatorial plane including the effects of pressure gradients, gravitation, and magnetic forces is used for both the radial and azimuthal motions. The viscosity was taken to be zero and the electrical conductivity was put to be infinite. With allowance made for gravitational and magnetic fields the periodic semidiurnal decisions for the disturbances caused by the planets are investigated. We deduced analytical relationships between indignations for radial and azimuthal components of the magnetic field in the equatorial plane of the solar corona and time, distance to the Sun's centre, heliographic longitude, solar wind speed and some characteristics of a planet.