

УДК 550.385

## О ПРОНИКНОВЕНИИ СТОРОННЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В МАГНИТОСФЕРУ ЗЕМЛИ

П.А. Седых, Е.А. Пономарев

### ON THE PENETRATION OF EXTERNAL ELECTRIC CURRENT INTO THE EARTH MAGNETOSPHERE.

P.A. Sedykh, E.A. Ponomarev

Предложенный в работах [1–4] механизм генерации электрической мощности во фронте головной ударной волны физически совершенно прозрачен и не требует введения каких-либо гипотетических свойств среды в виде дополнительной вязкости или электропроводности и в то же время отвечает всем необходимым требованиям к источнику мощности для магнитосферных процессов. Также было показано, что существует нормальная к фронту головной ударной волны компонента электрического тока, которая может замыкаться через магнитосферу. В данной работе мы подробно рассматриваем вопрос о проникновении этого стороннего тока в магнитосферу. Стационарный электрический ток в магнитосфере связан с градиентом газового давления. Поэтому, чтобы «пропустить» такой ток через тело магнитосферы, нужно этот градиент создать. Показано, что такой градиент в магнитосфере создается силой Ампера, возникающей за счет тока смещения, вызванного поляризацией магнитопаузы при изменении стороннего тока. Процесс продемонстрирован на простой модели.

The suggested mechanism of electric power generation in the bow shock front [1–4] is physically completely clear and does not require introduction of any hypothetical properties of plasma such as additional viscosity or electroconductivity and at the same time meets all necessary requirements to a power source for magnetospheric processes. Also, it was shown, that there exists electric current component normal to the bow shock front, which can be closed through the magnetosphere. In this paper, we discuss the question about the penetration of this current into the magnetosphere. The stationary electric current in the magnetosphere is connected to a gradient of gas pressure. Therefore, "to pass" such current through the magnetosphere, it is necessary to create this gradient. It is shown, that such gradient in the magnetosphere is created by the Ampere force arising due to a displacement current, caused by polarization of magnetopause at changing of the external current. The process is represented on simple model.

#### Проблема проникновения электрического тока в геомагнитосферу

Несколько слов на эту тему было сказано в предыдущих наших работах [1, 2]. Но проблема настолько серьезна, что стоит этому посвятить отдельную статью.

Проведем следующий мысленный эксперимент. Пусть у нас имеется бесконечный плоский конденсатор с расстоянием между пластинами  $2D$ . Плоскость  $XY$  декартовой системы координат пусть проходит посередине между пластинами. Однородное магнитное поле направлено по оси  $Y$ . Конденсатор заполнен идеальной плазмой, распределенной равномерно под нулевым электрическим потенциалом. Верхняя и нижняя пластины могут быть соединены с источником электрической энергии. В момент  $T$  подключим источник. На верхней и нижней пластинах установится некоторое значение потенциала. В тонком пристеночном слое толщиной  $d \sim 2\pi c/\omega_{pp}$  (где  $\omega_{pp}$  – протонная плазменная частота,  $c$  – скорость света) начнется процесс разделения зарядов и возникнет ток смещения  $\mathbf{j}^* = (\varepsilon/4\pi) \cdot \partial \mathbf{E} / \partial t$ , появится амперова сила  $\mathbf{F} = [\mathbf{j}^* \times \mathbf{B}] / c$ , которая начнет ускорять плазму. Единственная сила, которая противостоит амперовой – сила инерции. В условиях однородной среды сила инерции равна  $\rho \partial \mathbf{v} / \partial t$ :

$$\rho \partial \mathbf{v} / \partial t = [\mathbf{j}^* \times \mathbf{B}] / c = (\varepsilon/4\pi c) \cdot [\partial \mathbf{E} / \partial t \times \mathbf{B}]. \quad (1)$$

Учитывая, что  $\varepsilon = c^2/V_A^2$ , где  $V_A$  – Альфвеновская скорость, после интегрирования получим:  $\mathbf{v} = c[\mathbf{E} \times \mathbf{B}] / B^2$  – классическое выражение для скорости электрического дрейфа. Нужно заметить, что в дан-

ном случае оно получено не из соображений инвариантности Лоренца инерциальных систем, а из динамических соображений. Для нас важно отобразить в этом случае динамический процесс.

Когда плазма ускорится в слое ускорения  $d$  до скорости  $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$  дрейфа, а это произойдет за гиропериод, то в ее системе координат поле будет отсутствовать, а в неподвижной системе координат оно появится на границе движущейся и неподвижной плазм (см. рис. 1). Скорость продвижения границы, разделяющей движущуюся плазму от еще неподвижной, будет, следовательно,  $V_\phi \sim d\omega_B/2\pi$ , где  $\omega_B$  – гирочастота протонов. Подставив значения  $d$  и  $\omega_B$  в выражение для фазовой скорости, убеждаемся что это альфвеновская скорость, как и следовало ожидать. Итак, в наш конденсатор стороннее электрическое поле проникает без ограничений в виде альфвеновской волны, а ток только в виде тока смещения. То есть ток через наш конденсатор течет, только пока там длится переходный процесс. В установившемся режиме ток через конденсатор отсутствует. Если же магнитное поле неоднородно по оси  $X$ , то градиент газового давления возникнет сам из-за неоднородности течения.

Время становления электрического поля в системе при этом порядка  $\tau_E = L/V_\phi$ , а время становления тока – порядка  $\tau_I = L^*/V$ , где  $L$  – размер системы,  $V_\phi$  – фазовая скорость распространения электромагнитного сигнала поперек системы,  $L^* = (B/\nabla B)$ ,  $V$  – скорость конвекции плазмы. Грубая оценка применительно к магнитосфере дает время становления электрического поля – сотни секунд, время становления электрического тока – около часа.

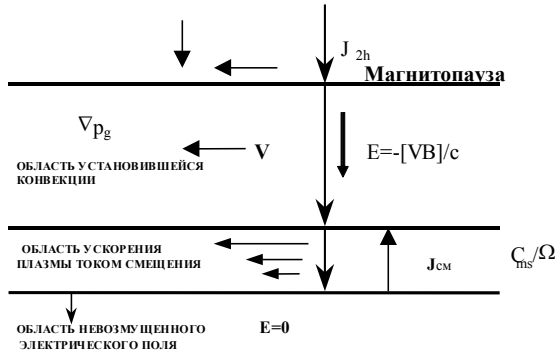


Рис. 1. Схема проникновения стороннего тока в плазму и возбуждение магнитосферной конвекции.

Обратимся теперь к рис. 2. На нем видно, что с увеличением электрического поля градиент давления по линии «день–ночь» возрастает. А это означает, что увеличивается плотность тока «утро–вечер» и увеличивается в целом весь этот ток. Иначе говоря, увеличение поля «утро–вечер» влечет за собой увеличение тока «утро–вечер». Возникает такая ситуация, когда увеличение электрического тока вызывает немедленное пропорциональное увеличение электрического тока. В данном случае увеличение тока происходит с задержкой и пропорционально не первой степени поля,  $a \sim E^{2/3}$ .

Воспользуемся выражением для газового давления в геомагнитосфере. Согласно работам [5, 6]:

$$p_g = p_g^0 \left( \frac{L_\infty}{L} \right)^{20} \exp \left( -\frac{5}{3} \int \frac{dr}{V_r \tau} \right), \quad (2)$$

где  $dt = dR/V_R = R_0 d\lambda/V_\lambda$ ,  $\Delta t = \int dt$  – транспортное время, т. е. время, за которое силовая трубка дойдет от границы до данной точки на потоковой линии, а  $V_R$  и  $V_\lambda$  – радиальная и азимутальная компоненты скорости конвекции. Выражение (2) показывает, как газовое давление меняется при движении плазмы вдоль линии конвекции.

Соотношение между током и полем легко получить из (1, 2) в случае, когда поле «утро–вечер» – постоянно. Тогда

$$J_y = \int j_y dx = A^* E^{2/3}, \text{ где } A^* = 2.52 x_\infty^{20/3} \times (c p_g^0 / B_0) (c \tau_{p0} / B_0 R_0)^{2/3}. \quad (3)$$

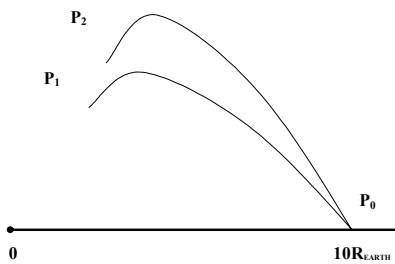


Рис. 2. Рельеф плазменного давления в магнитосфере Земли (на ночной стороне) в зависимости от величины электрического поля. С увеличением электрического поля градиент давления по линии «день–ночь» возрастает.

Интегрирование по  $x$  ведется от  $x_\infty$  до максимума  $x = x_m$ , где  $x_m = (B_0 R_0 / 4c E \tau_{p0})^{1/6}$ .

При этом полагалось, что  $\tau_p = \tau_{p0} x^4$ ,  $B = B_0 x^{-3}$ , и что  $p_g^0 = p_g(x_\infty)$  – плазменное давление на границе. В данном случае все расстояния нормированы на радиус Земли  $R_0$ . Время жизни плазменной трубки относительно высыпаний протонов  $\tau_p$  при движении по стандартной траектории конвекции около двух часов. Этому соответствует  $\tau_{p0}$  около 10 с (в работе [5] было принято 12 с). Становление тока можно аппроксимировать экспоненциальной зависимостью. Тогда

$$J_y = A^* [1 - \exp(-t/\tau_i)] E^{2/3} + J_{0y}. \quad (4)$$

По смыслу,  $J_y$  – это тот дополнительный ток, который необходим магнитосфере, чтобы совершить работу над плазмой, т.е. придвинуть к Земле максимум давления и увеличить его амплитуду (см. рис. 2). Это ток МГД-компрессора, нагнетающего плазму к Земле.

Предположим, что в невозмущенном состоянии полная мощность ионосферных процессов составляла  $W_0 = J_{0y} \Phi_0(2y_g)$ . Пусть затем разность потенциалов увеличилась на  $d\Phi$ . Соответственно увеличится электрическое поле, и начнется увеличение тока  $J_y$ . Таким образом, мощность, потребляемая магнитосферой, увеличивается в два приема:

$$dW = W_0 \eta [1 - \exp(-t/\tau_E)] + A^0 \Phi_0^{5/3} \eta^{2/3} (1+\eta) [1 - \exp(-t/\tau_i)], \quad (5)$$

где  $\eta = d\Phi/\Phi_0$ ,  $A^0 = A^*(2y_g)^{1/3}$ ,  $A^* = p_g^0 [16c^5 \tau_0^2 x_\infty^{20} / B_0^5 R_0^2]^{1/3}$ ,  $y_g = 28.5 R_0 = 1.8 \cdot 10^{10}$  см.

Первое увеличение происходит при прежнем токе из-за приращения разности потенциалов, второе – из-за приращения тока. При принятых выше значениях величин второе слагаемое при  $\Phi_0 = 120$  кВ равно  $\sim 6 \cdot 10^{18} \eta^{2/3} (1+\eta) [1 - \exp(-t/\tau_i)]$  эрг/с. При рабочих значениях  $\eta = 0.3-0.5$  эта величина соответствует мощности средней суббури. Естественно, что увеличение тока поперек магнитосферы вызовет вытяжение магнитосферного магнитного поля в хвост, а уменьшение с началом break-up из-за ответвления в ионосферу – его диполизацию.

### Заключение

Из сказанного выше следует важный физический вывод. Процесс проникновения тока в магнитосферную плазму является двухступенчатым. Сначала формируется поле поляризации, которое «послойно» проникает в плазму. Точнее, в плазму проникает соответствующий этому полю импульс. Затем, если система неоднородна, течение может перераспределить давление так, что в плазме из-за появления градиентов возникнет электрический ток. С энергетической точки зрения этот ток необходим для поддержания конвекции в неоднородной системе. Всякое изменение внешнего тока через магнитосферу вызывает перестройку конвекции за время порядка времени пробега магнитозвуковой волны от магнитопаузы до центра системы, поскольку волна перестройки идет от обоих флангов. При этом энергетические возможности для внутримангнитосферных процессов сильно сокращаются. Пока не уста-

новилось новое распределение газового давления, роль силы, противостоящей силе Ампера, берет на себя сила инерции. Это соответствует ускорению плазмы, а следовательно, изменению электрического поля. По нашему мнению, имеет смысл попытаться наблюдать волну перестройки в высоких широтах на радарх системы SuperDARN или на телевизионных системах с большим углом зрения.

*СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

1. Ponomarev E.A., Urbanovich V.D., Nemtsova E.I. On the excitation mechanism of magnetospheric convection by the Solar Wind // Proceedings of 5<sup>th</sup> International conference on Substorms. ESA SP-443. 2000. P. 553.
2. Ponomarev E.A., Sedykh P.A., Mager O.V. From the solar wind to the magnetospheric substorm // Chinese Journal of Space Science. 2005. V. 25, № 5. P. 397–405.

3. Ponomarev E.A., Sedykh P.A., Urbanovich V.D. Bow shock as a power source for magnetospheric processes // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2006. V. 68. P. 685–690.
4. Ponomarev E.A., Sedykh P.A., Urbanovich V.D. Generation of electric field in the magnetosphere, caused by processes in the bow shock region // Ibid. 2006. V. 68. P. 679–684.
5. Пономарев Е.А. Механизмы магнитосферных суббурь. М.: Наука, 1985. 160 с.
6. Ponomarev E.A. On one plausible simple explanation for substorm break-up // Proceedings of 5-th International conference on Substorms, ESA SP-443. 2000. P. 549.

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*