

О возможном самосогласованном механизме формирования и распаде кольцевого тока Земли

Богданов В.В., Кайсин А.В.

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
Россия
vbogd@ikir.ru

В безвихревом магнитном поле, уравнение движения ведущего центра в плоскости экватора переменного аксиального магнитного поля (широта $\lambda = 0$, $v_{II} = 0$) имеет вид

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = c \frac{E}{B} \vec{e}_2 + \frac{k}{r} \frac{v_{\perp}^2}{2\omega_L} \vec{e}_3, \quad (1)$$

где $\vec{e}_1 = \vec{B}/B$, \vec{e}_2, \vec{e}_3 – единичные векторы, направленные вдоль поля \vec{B} , главной нормали и бинормали к силовой линии, соответствующие криволинейным координатам X_1, X_2, X_3 (координата X_1 совпадает с силовой линией) [1]; $v \equiv v_{\perp}$ – полная скорость частицы, B и E – магнитное и электрическое поле, ω_L – ларморовская частота. В (1) учтено, что если $rot\vec{B} = 0$, то $(1/r_{кр}) = k/r$, k – некоторый коэффициент пропорциональности между радиус-вектором r и кривизной силовой линии $r_{кр}$. В аксиальном поле и в цилиндрической системе координат из (1) для соответствующих скоростей по координатам ϕ и r имеем ($\mu = mv_{\perp}^2/2H$ – первый адиабатический инвариант)

$$U_{\phi} = c\mu/er_{кр}, U_r = dr/dt = cE/B. \quad (2)$$

Из первого соотношения (2) получаем

$$rU_{\phi} = (c/e)k\mu = const \quad (3)$$

с точностью дрейфового приближения ($\mu = const$).

Лагранжиан заряженной частицы, движущейся в плоскости экватора аксиального магнитного поля, с той степенью точности, с которой можно отделить дрейфовое движение от ларморовского вращения, в цилиндрической системе координат имеет вид

$$L = mU_{\phi}^2/2 + mU_r^2/2 + (e/c)rA_{\phi}. \quad (4)$$

На основе (4) и уравнения Лагранжа для обобщенного импульса частицы P_{ϕ} в дрейфовом приближении получим ($U_r \neq 0$)

$$P_{\phi} = mrU_{\phi} + (e/c)rA_{\phi}. \quad (5)$$

Учитывая, что справедливо (3), получаем

$$rA_{\phi} = const \quad (6)$$

с точностью $\mu = const$. Поскольку в плоскости экватора аксиального поля $A_{\phi} \sim rB$, то из последнего выражения следует

$$r^2B = const \quad (7)$$

Следовательно, помимо выражения (6), пропорционального потоку $\Phi \sim rA_{\phi}$, сохраняется и выражение (7). Из явного вида первого адиабатического инварианта ($\mu = mv_{\perp}^2/2B$)

$= \text{const}$ выразим значение магнитного поля B и подставим в (7). Получим ($v \equiv v_{\perp}$)
 $er^2mv^2/2c\mu = \text{const}$ или

$$rv = \text{const} \quad (8)$$

Т.к. $\mu \sim (v^2/B) \sim T/B$, где T – температура частиц, то (8) можно представить в виде

$$r^2T = \text{const} \quad (9)$$

Выражения (1)–(9) записаны для текущих значений радиуса r , полей B , E и энергии $v^2 \equiv v_{\perp}^2$ при условии, что возмущенное магнитное поле остаётся аксиальным.

Определим смещение частицы по r в результате изменения магнитного поля за счет симметричной компоненты кольцевого тока, пропорциональной Dst-вариации (см. форм. (2)), воспользовавшись результатами работы [1]. Будем полагать, что влияние КТ на дипольное поле Земли зависит только от времени, а асимметрия поля и его радиальная зависимости отсутствуют. Пусть \mathbf{E} – вихревое электрическое поле, которое, согласно уравнению Максвелла, появляется из-за изменения магнитного поля: $\text{rot}\mathbf{E} = -\partial\mathbf{B}/\partial t = -d\mathbf{B}_{dst}/dt$. В экваториальной плоскости поле \mathbf{E} и поле \mathbf{B} имеют по одной компоненте в цилиндрической системе координат (r, φ, z) , в которой ось z направлена вдоль оси диполя $\mathbf{E} = (0, E_{\phi}(r, t), 0)$ и $\mathbf{B} = (0, 0, B_z(r, t))$, где $B_z(r, t) = B_e(r, t) \cdot (r_e/r)^3$, B_e – стационарное поле на поверхности Земли. Выразив из уравнения Максвелла поле E_{ϕ} и подставив его значение во второе уравнение для радиального дрейфа U_r , получим связь между значением Dst-вариацией и радиус-вектором частицы, на который она сместится относительно своего начального положения r_{in} в момент начала бури ($t=0$) [2],

$$B_{dst} = 2B_e(r_e/r)^3(1 - r/r_{in}) \quad (10)$$

где r_{in} – первоначальный радиус дрейфовой оболочки протона при $B_{in} = B_e \cdot (r_e/r_{in})^3$, или, разрешив (10) относительно r_{in} , получим

$$r_{in} = r/[1 - (B_{dst}/2B_e)(r/r_e)^3] \quad (11)$$

Перепишем решение (10) как

$$-2\pi B_e r_e^3/r + \pi r^2 B_{dst} = -2\pi B_e r_e^3/r_{in} \quad (12)$$

и, поскольку поток дипольной составляющей магнитного поля через дрейфовую оболочку имеет вид

$$\Phi_d(r) = \int_0^r \frac{B_e r_e^3}{r^3} 2\pi r dr = - \int_r^{\infty} \frac{B_e r_e^3}{r^3} 2\pi r dr = - \frac{2\pi B_e r_e^3}{r}, \quad (13)$$

то с учетом этого выражения и (12) получаем

$$\Phi_d + \pi r^2 B_{dst} = \Phi_d(r_{in}) = \text{const}. \quad (14)$$

Следовательно, (10) можно представить в виде, который совпадает с условием сохранения полного потока магнитного поля, охватываемого дрейфовой оболочкой (третий адиабатический инвариант). Так как $B(r) = (B_e r_e^3)/r^3$, представим (12) в виде $r^2[B(r) - B_{dst}/2] = r_{in}^2 B(r_{in}) = \text{const}$ или

$$r^2 B_r = r_{in}^2 B_{in} = \text{const} \quad (14')$$

что аналогично общему выражению (7).

Из (10) и (14') следует, что при $V_{dst} < 0$ частицы дрейфуют от Земли $r > r_{in}$ с уменьшением согласно (9) температуры, и, наоборот, при $V_{dst} > 0$ частицы дрейфуют к Земле $r < r_{in}$ с увеличением температуры. Это справедливо для внутренней области по отношению к КТ ($L < 3$) и для внешней области ($L > 4$), как на главной, так и восстановительной фазе бури.

В работе [2] показано, что модель смещения дрейфовой оболочки от Земли на главной фазе бури, определяемое уменьшением поля B во внутренней плазмосфере, удовлетворительно описывает понижение температуры протонов в экваториальной плоскости и удаление от Земли, зарегистрированное спутниками МАГИОН-5 и ИНТЕРБОЛ-2. На восстановительной фазе всё происходит наоборот: протоны нагреваются и приближаются к Земле. При этом модель деформированной силовой линии при возмущении не рассматривалась. На основе результатов работ [2,3], в которых построена динамическая система координат, описывающая перенос плазмы в нестационарном магнитном поле с учётом деформации силовой линии, и данных спутника "Ого-3" [5] рассмотрим динамику магнитной бури, которая произошла в начале июля 1966г. Смысл модели в том, что по измеренным значениям реального поля в точке с радиус-вектором r можно определить параметры поля V^{in} и r_{in} откуда стартовала частица, или, наоборот, куда она придёт в конце возмущения, если известно деформированное поле. Зададим уравнение возмущенной силовой линии в виде $r = R_0 \cos^k \lambda$ (см. работы [3,4]), разделив её деформацию на две части – на главную и восстановительную. k для уравнения силовой линии на главной фазе определим соотношением $k_{ГЛ} = 2 + 1.5(\sigma_{ГЛ})^2$, где $\sigma_{ГЛ} = t/\tau_{ГЛ}$ – безразмерная величина, пропорциональная времени от начала развития магнитной бури до начала восстановления. Для восстановительной стадии $k_B = 2 + 1.5(1 - \sigma_B^2)$, где $\sigma_B = t/\tau_B$ – пропорциональна времени, уже отсчитываемому от начала восстановительной фазы магнитной бури, а τ_B – характерное время восстановления магнитного поля после максимальной деформации в момент $\sigma_B = 0$, связанной с развитием главной фазы бури. В конечный момент главной фазы коэффициент $k_{ГЛ} (\sigma_{ГЛ} = 1)$ равняется начальному значению $k_B (\sigma_B = 0)$. На рис.1 представлены невозмущенные силовые линии дипольного поля Земли и КТ (а) и их суперпозиция (б).

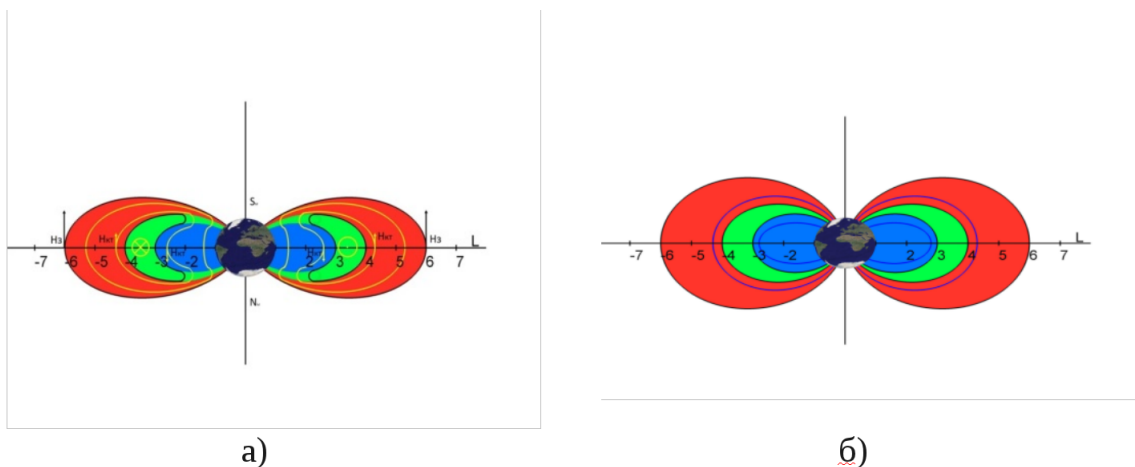


Рис. 1. а) Силовые линии дипольного магнитного поля Земли (черный цвет) и кольцевого тока (желтый цвет). Указано направление кольцевого тока. б) Суперпозиция силовых линий магнитного диполя и кольцевого тока Земли. Во внешней области от кольцевого тока $k \leq 2$, во внутренней области при $k \geq 2$, $R = R_0 \cos^k \lambda$

На рис.2 для индекса D_{st} показано развитие этой бури по дням [4], откуда следует, что главная фаза бури $\tau_{ГЛ} = 1,5$ дня, а восстановительная $\tau_B = 4$ дня. Для этой бури на основе конкретных значений $D_{st}(t)$ и прослежена динамика возмущенных силовых

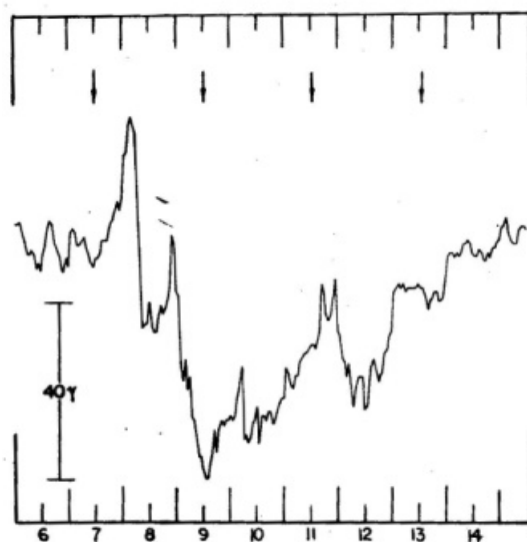


Рис. 2

линий внутренней и внешней областей магнитосферы по отношению КТ. На рис.3 Иллюстрация к предложенному механизму формирования кольцевого тока на главной и восстановительных фазах магнитной бури на основе модельного представления сжатия и расширения силовых линий в области захвата магнитосферы Земли. На рисунке представлены соответствующие изменения в распределении направленных потоков протонов j с энергиями в интервале $31\text{эВ} \leq E_p \leq 49\text{кэВ}$ по данным спутника “ОГ О-3” [5]: а) перед началом бури, 8 июля (обозначено синим цветом); б) в конце главной фазы 9 июля (красный цвет); в) в конце магнитной бури, 13 июля. КТ выделен зеленым цветом.

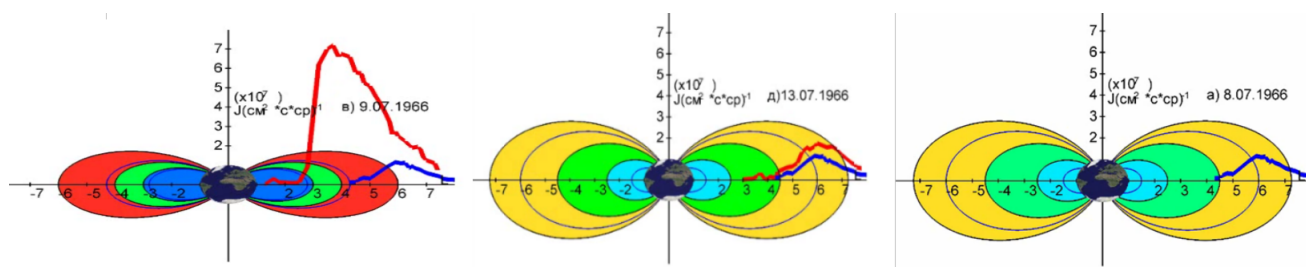


Рис. 3. Иллюстрация динамики внутренней и внешней магнитосферы по отношению к КТ на примере изменения силовых линий

Выводы

Показано, что на главной фазе магнитной бури во внешней области по отношению к КТ ($L > 4$) заряженные частицы за счёт электрического дрейфа двигаются к Земле (к КТ) и при этом нагреваются, а на восстановительной фазе удаляются от Земли (от КТ) и остывают. В тоже время во внутренней по отношению к КТ области ($L < 3$) на главной фазе магнитной бури картина обратная: частицы двигаются от Земли к формирующемуся КТ и остывают, а на восстановительной фазе – от КТ, т.е. к Земле, и нагреваются. Следовательно, на главной стадии бури складываются естественные условия, при которых за счет встречного движения заряженных частиц КТ начинает усиливаться. При этом он как бы сам себя формирует, “собирая” вокруг и “подтягивая” к себе плазму. На стадии восстановления, когда происходит ослабление давления солнечного ветра на магнитосферу,

дипольное поле начинает восстанавливаться и, как следствие, происходит ослабление КТ. В этом случае предложенный механизм формирования и ослабления КТ автоматически предполагает внутри самого КТ существование области с $3 < L < 4$, где поле B на главной и восстановительной фазах остаётся постоянным, т.к. здесь и $\partial B / \partial t$, и электрическое поле изменяют знак и поэтому равны нулю. Подтверждением этого является экспериментально зарегистрированный факт постоянства параметров КТ в его внутренней области (спутник ССЕ программы АМРТЕ) [7].

Литература

1. Морозов А.И., Соловьев Л.С. Движение заряженных частиц в электромагнитных полях // Вопросы теории плазмы. 1963а. Вып.2. С. 177-261.
2. Веригин М.И., Котова Г.А., Безруких В.В., Богданов В.В., Кайсин А.В. Дрейф ионов во внутренней плазмосфере Земли во время магнитосферных возмущений и динамика температуры протонов // Геомагнетизм и аэронавигация. 2011. Т.51, С.41-50
3. Богданов В.В., Плетнев В.Д. К вопросу о динамической системе координат в геомагнитной ловушке // Космические исследования. 1974. Т.12. Вып.3. С.380-386.
4. Богданов В.В. Исследование в геосферных оболочках процессов, инициированных солнечным и литосферным воздействием. Докторская диссертация. с. Паратунка, Камчатский край. 2008. С.264.
5. Frank L.A. On the extraterrestrial ring current during geomagnetic storms // J. Geophys. Res. 1967.
6. Редерер Х. Динамика радиации, захваченной геомагнитным полем. – М.: Мир. – 1972. – 192 с.
7. Тёмный В.В. Плазма кольцевых токов магнитосферы Земли. Модель в сопоставлении с результатами эксперимента АМТЕ/ССЕ // Космич.ислед. Т.25. вып.3. – 1987. – С.428-438.

Possible self-consistent mechanism of formation and disintegration of a ring current

Bogdanov V.V., Kaisin A.V.

Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation FEB RAS, Russia

One of possible self-consistent mechanism of formation and disintegration of a ring current (RC) is offered in this work. It is known, that on the main phase of magnetosphere disturbance at low and average latitudes there is a reduction of a horizontal component of a geomagnetic field, and on the restored phase the field grows and comes back practically to an initial level. This phenomenon is explained by formation and disintegration RC, concentrated basically in the field of geomagnetic equator on distances equal to several radiuses from a surface of the Earth. At the same time in magnetosphere areas outside of RC (the maximum is located in an interval $L \sim 3-4$) it should be expected the return picture: the magnetic field grows on the main phase of magnetic storm, and on the reductional phase it decreases up to the unperturbed meaning.

The analysis has shown, that at such changes of a field in external and internal areas (in relation to RC) the direction of particles movement and the change of its energy has various character. In internal area of RC on the main phase of magnetic storm the particles move from the Earth and also cool down, and on the reductional phase – to the Earth, and heat up. In external area of a ring current a picture is opposite: on the main phase the charged particles will move to the Earth (to current ring) and thus to be heated up, and on the reductional phase – leave from the Earth (from a ring) and to cool down. Hence, on the main phase of magnetic storm from side to side of an arrangement of maximum RC there are natural conditions, at which the ring current can amplify at the expense of opposite movement of the charged particles to it. At the same time on the reductional phase the charged particles move from a ring current, causing thus its additional reduction. The beginning of disintegration of RC is weakening Solar wind (SW) and return of the magnetosphere to the conditions of stationary SW.