

УДК 550.385

О ДВУХСТУПЕНЧАТОМ РАЗВИТИИ АКТИВНОЙ ФАЗЫ СУББУРИ

П.А. Седых

ON THE TWO-STAGE DEVELOPMENT OF ACTIVE SUBSTORM PHASE

P.A. Sedykh

Результаты исследования процессов в области околосолнечной ударной волны и процесса проникновения стороннего тока в магнитосферную плазму указывают на сценарий суббури с двухстадийным процессом развития активной фазы как на альтернативу классическому сценарию суббури с фазами роста, взрывной и восстановления. Можно сказать, что такой двухступенчатый процесс развития магнитосферных возмущений наблюдается в действительности. Исследователи при описании фаз суббури по данным наблюдений отмечают двухстадийный процесс развития активной фазы суббури. В отличие от классического описания трех фаз суббури активную фазу суббури некоторые исследователи разделяют на активно-конвективную фазу и фазу экспансии.

Results of research into processes in the bow shock region and external current penetration into the magnetospheric plasma lead to the scenario of a substorm with a two-stage active phase as an alternative to the traditional scenario of the substorm with phases of growth, expansion, and recovery. This two-stage development of magnetospheric disturbances is really observed. When describing substorm phases with the use of observational data, researchers note that the active substorm phase may be a two-stage process. In contrast to traditional description of three phases of substorm, some researchers assert that the active substorm phase consists of the active-convective and expansion phases.

При переходе фронта в несколько раз растет напряженность тангенциальной составляющей магнитного поля солнечного ветра и плотность. Поэтому, помимо всего прочего, фронт головной ударной волны (ГУВ) представляет собой токовый слой. Текущий в нем ток является дивергентным, т. е. фронт представляет собой генератор тока. Поскольку через фронт пронесется плазма с магнитным полем, то в системе координат фронта возникает электрическое поле. Таким образом, фронт ГУВ является источником электрической мощности (рис. 1). Эта электрическая мощность распределяется между двумя потребителями – переходным слоем (ПС или magnetosheath) и собственно магнитосферой. При этом следует сказать, что ПС можно отнести к потребителям лишь условно, поскольку в определенном режиме ПС может работать как генератор. Мощность, потребляемая магнитосферой, затрачивается на работу компрессора и состоит из активной и реактивной мощности. Активная покрывает потери в ионосфере (в основном омические), реактивная возвращается к магнитосферному МГД-компрессору (см. рис. 1). Мощность, развиваемая генератором на фронте ГУВ, не зависит, по всей вероятности, от мощности, потребляемой магнитосферой, но тогда возникает необходимость в «энергетическом депо», в котором может сбрасываться мощность, производимая ГУВ, но не потребляемая магнитосферой. На такую роль подходит ПС. На меридиане утро–вечер разность потенциалов между утренним и вечерним бортами фронта ГУВ составляет примерно $155 \times 2 \sim 310$ кВ, между флангами магнитосферы ~ 180 кВ, а в переходном слое падает и составляет примерно 65 кВ с каждой стороны. Если считать, что через ПС и магнитосферу течет общий ток, то электрическая мощность, рассеиваемая в магнитосфере, мало отличается от используемой в ПС (очевидно, на «доускорение» плазмы). Интересно отметить, что смена знака B_z -компоненты ММП приводит в нашей схеме к тому, что картина распределения потенциала просто меняет знак, оставаясь «по модулю» почти неизменной. Магнитосфера принять при северном ММП не может такую же мощ-

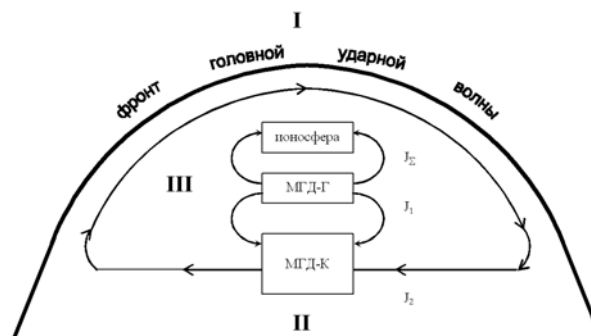


Рис. 1. Схема расположения функциональных блоков в магнитосфере: I – МГД-генератор, преобразующий кинетическую энергию солнечного ветра в электромагнитную; II – МГД-компрессор, преобразующий электрическую энергию в газовое давление. III – вторичные МГД-генераторы, преобразующие энергию сжатого газа в электрический ток, питающий электроджеты в ионосфере.

ность, как при южном поле. Формально это соответствует увеличению сопротивления магнитосферы как нагрузки для солнечного ветра (генератора). Располагая значениями плотности тока и распределением потенциала, мы можем рассчитать мощность, поступающую внутрь объемов, ограниченных поверхностью фронта ГУВ и магнитопаузой:

$$W_g = \int_{\Sigma} \Phi_g j_n d\Sigma_g, W_m = \int_{\Sigma} \Phi_m j_n d\Sigma_m. \quad (1)$$

Оценки, сделанные по этим формулам, как и следовало ожидать, дают ту же качественную картину, что и оценки по падению потенциала. Мощность, втекающая внутрь пространства, ограниченного ГУВ, порядка $3.5 \cdot 10^{19}$ эрг/с, а втекающая в область пространства, ограниченную магнитопаузой (до $\phi \leq 135^\circ$ в обоих случаях), – порядка $2 \cdot 10^{19}$ эрг/с при тех же средних условиях в солнечном ветре.

Теперь коротко обсудим условия, которые должны удовлетворяться для прохождения тока внутри магнитосферы (рис. 2). Пусть в исходном состоянии электрический ток однороден. Если в некоторый момент ток j_0 увеличится на δj вне нашего объема,

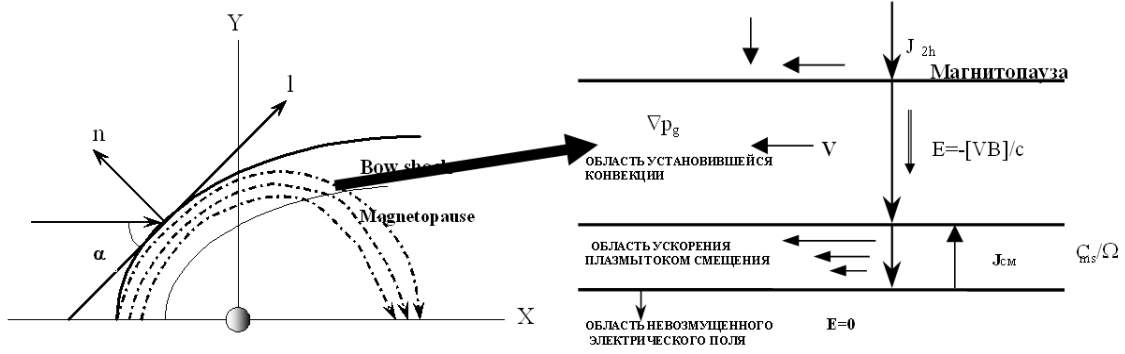


Рис. 2. Схема проникновения стороннего тока в магнитосферную плазму и возбуждения магнитосферной конвекции.

то на его границе начнет образовываться заряд с поверхностной плотностью: $\mu = \int \delta j dt$. Образующееся при этом электрическое поле \mathbf{E} вызовет появление тока смещения $\mathbf{j}_c = (\epsilon/4\pi) \partial \mathbf{E} / \partial t$, создающего амперову силу, которая уравнивается только силой инерции, поскольку соответствующий градиент давления еще не успел сформироваться:

$$\rho_0 \partial \mathbf{V} / \partial t = [\mathbf{j}_c \times \mathbf{B}] / c. \quad (2)$$

В условиях магнитосферы диэлектрическая проницаемость плазмы $\epsilon = c^2 / V_A^2$, тогда интегрирование (2) дает

$$\mathbf{V} = c [\mathbf{E} \times \mathbf{B}] / B^2 \quad (3)$$

с учетом того, что квадратами возмущенных величин можно пренебречь как имеющими второй порядок малости. Физический смысл изложенного заключается в том, что электрическое поле поляризации возникает внутри двойного слоя толщиной порядка

$$\xi = 2\pi c_s / \omega_B = \pi c / \omega_{pp},$$

где c_s – скорость быстрой магнитозвуковой волны, ω_{pp} – протонная плазменная частота (такая толщина характерна для токовых слоев в бесстолкновительной лабораторной и космической плазме). В процессе становления это поле образует ток смещения, формирующий амперову силу, которая ускоряет плазму внутри этого слоя. Тогда как в процессе становления электрическое поле в системе координат плазмы падает до нуля, в лабораторной оно растет от нуля до величины $[\mathbf{V} \times \mathbf{B}] / c$. Поскольку после релаксации поля внутри элементарного слоя граница с поверхностным зарядом сместилась внутрь плазмы (за время $t_1 \sim 2\pi / \omega_B$) на расстояние порядка ξ , то все вышеописанное повторяется. Очевидно, это означает проникновение импульса, связанного с электрическим полем, внутрь плазмы со скоростью звука. Так начинает формироваться конвекция (см. рис. 2). Если в плазме нет потерь и $\text{div} \mathbf{V} = 0$, то на этом дело и заканчивается. Плазма получает импульс от электрического поля, соответствующий скорости установившейся конвекции.

Стационарный электрический ток при этом не возникает. Но если объем ограничен стенками или в нем имеется неоднородное магнитное поле, то первичная конвекция перестраивается. При этом может образоваться градиент давления, существование которого означает, что в плазме возникает электри-

ческий ток. Это и означает проникновение внешнего тока в плазму.

Рассмотрим теперь формирование градиента давления из-за сжимаемости газа. Из уравнения непрерывности

$$\rho' = -\rho_0 \int \text{div} \mathbf{V} dt. \quad (4)$$

Интегрирование ведется по всему времени формирования конвекции t_2 .

Поэтому можно записать (4) в виде

$$\rho' = \rho_0 (\mathbf{V} (\nabla p_B) / p_B) t_2 \sim \rho_0 (V / L_B) t_2. \quad (5)$$

Возмущение давления p' находим из уравнения состояния

$$p' = c_s^2 \rho', \quad (6)$$

здесь c_s – скорость быстрой магнитозвуковой волны, поскольку магнитная упругость очень существенна в магнитосфере. С учетом того, что скорость быстрого магнитного звука в магнитосфере практически равна альфвеновской скорости, находим:

$$\nabla p' \sim -\rho_0 c_s^2 V t_2 / L^2 \sim \mathbf{F}, \quad (7)$$

где \mathbf{F} – амперова сила. Поскольку $\mathbf{V} \sim \mathbf{F} t_1 / \rho_0$, то

$$t_1 t_2 = L^2 / c_s^2. \quad (8)$$

Это соотношение связывает размеры системы со временем установления стационарного распределения давления – с формированием градиента газового давления, который определяет ток в плазме. Иначе говоря, t_2 является характерным временем проникновения электрического тока в плазменный объем. Принимая $t_1 = \omega_B^{-1} \sim 1$ с, $L \sim 10^{10}$ см, $c_s \sim 3 \cdot 10^8$ см/с, находим $t_2 \sim 1000$ с. Такая длительность переходного процесса для магнитосферы не вызывает возражений. Получается, что наша система имеет три характерных времени: $t_1 = 2\pi / \omega$ – время становления электрического поля «в точке», t_2 – время проникновения электрического тока в объем и $t_3 = L / c_s$ – время установления электрического поля в системе размером L . Следует отметить, что градиент газового давления формируется и в том случае, если магнитное поле однородно, но есть некая стенка, ограничивающая движение плазмы. При этом (8) имеет тот же вид, а время t_2 приобретает наглядность. Это просто время заполнения объема между стенкой и точкой, находящейся на некотором расстоянии от стенки, плазмой,двигающейся со скоростью V в направлении стенки. Из сказанного выше следует важный

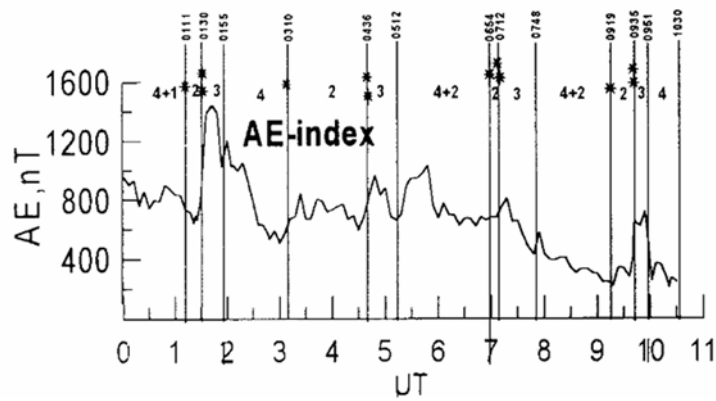


Рис. 3. Таймирование четырех суббурь CDAW9C [5]. Одна и две звездочки на графике отмечают двухступенчатое развитие активной фазы каждой суббури.

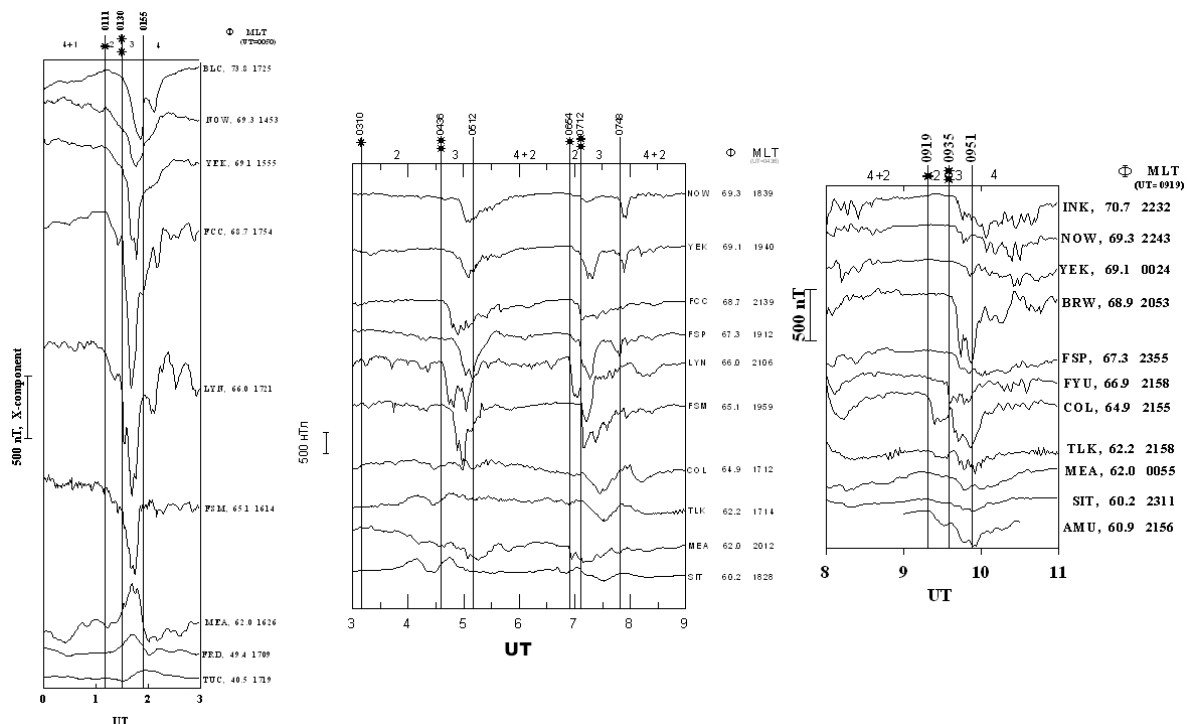


Рис. 4. Результаты таймирования цепочки суббурь CDAW9C [5]. X-магнитограммы для четырех суббурь 3 мая 1986 г. Одной и двумя звездочками на графиках отмечено двухстадийное развитие активной фазы суббури.

физический вывод. Процесс проникновения тока в 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.

Вывод

Таким образом, существуют два характерных временных параметра, связанных со снабжением энергией магнитосферы и с развитием магнитосферных возмущений. Сам авроральный брейкап, т. е. начало фазы экспансии, есть следствие неоднородности магнитосферы и движения плазмы [1].

Можно сказать, что такой двухступенчатый процесс развития магнитосферных возмущений наблю-

дается в действительности. Исследователи при описании фаз суббури по данным наблюдений отмечают двухстадийный процесс развития активной фазы суббури. В отличие от классического описания трех фаз, активную фазу некоторые исследователи разделяют на активно-конвективную фазу и фазу экспансии [2]. В [2] были приведены характерные признаки каждой фазы и дано описание четырех фаз суббури. В работе [3] проведено описание четырех суббурь и предпринята предварительная попытка интерпретации полученных результатов. Теперь же, с учетом результатов исследования процессов в районе ГУВ и снабжения энергией магнитосферы, можно привести более корректную интерпретацию существования двухступенчатого процесса развития активной фазы суббури. На рис. 3, 4 приведены примеры таймирования фаз цепочки из четырех суббурь CDAW9C с использованием A_E -индекса и X-магнитограмм наземных станций. По указанным данным можно заметить, что активная фаза суббури

имеет двухстадийное развитие (см. обозначения на рисунках). Результаты исследования процессов в области околосредней ударной волны и процесса проникновения стороннего тока в магнитосферную плазму [1, 4, 5] указывают на сценарий суббури с двухстадийным процессом развития активной фазы как на альтернативу классическому сценарию суббури с фазами роста, взрывной и восстановления и частично согласуются с описанием фаз суббури, приведенным в работе [2]. Отличие состоит в том, что суббулевой «взрыв» (break-up) рассматривается не как следствие быстрых локальных изменений во времени, а как следствие неоднородности системы и движения плазмы, т. е. в полной производной по времени d/dt , которую мы наблюдаем на поверхности Земли, для всех процессов работает только член $\mathbf{V} \nabla$, а член с частной производной $\partial/\partial t$ не существен [1]. Продольные токи из магнитосферы есть результат дивергенции объемных токов магнитосферы, а не процесс разрыва тока хвоста.

Работа выполнена в рамках гранта МК-3697.2008.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономарев Е.А., Седых П.А. Как разрешить проблему суббури? (Обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46, № 4, С. 560–575.
2. Мальцев Ю.П. и др. Физика околосреднего космического пространства. Т. 1. Апатиты: КНЦ РАН, ПГИ, 2000. 216 с.
3. Седых П.А., Миненко Л.В. Исследование суббури CDAW9C // Байкальская международная молодежная научная школа по фундаментальной физике. Иркутск. 1999. Т. 2. С. 562–576.
4. 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.
5. Ponomarev E.A., Sedykh P.A., Urbanovich V.D. Generation of electric field in the magnetosphere caused by processes in the bow shock // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2006. V. 68. P. 679–684.

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск
Иркутский государственный медицинский университет, Иркутск*