

## **Явление пересоединения магнитных силовых линий в лобовой области магнитосферы в рамках Топологического формализма**

**З. Кереселидзе, М. Чхитунидзе, Н. Лекишвили**

Взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой земли является сложным физическим процессом, который в макроскопическом приближении описывается системой уравнений магнитной гидродинамики. Из-за математических осложнений, связанных с получением общего МГД решения, обычно рассматриваются отдельные блоки этого взаимодействия, которые определяются в процессе разбиения полной задачи. К числу таких блоков относится проблема пересоединения магнитных силовых линий в замороженном в солнечный ветер межпланетного магнитного поля (ММП) и граничных силовых линий геомагнитного поля [1].

Известно, что пересоединение магнитных силовых линий обязательно происходит в среде с конечной электрической проводимостью. Плазма солнечного ветра до взаимодействия с магнитосферой является идеально проводящей и поэтому способна без диссипации транспортировать ММП. В переходной области магнитосферы, из-за скачкообразного изменения термодинамических параметров плазмы на фронте ударной волны, солнечный ветер становится средой с высокой, но конечной электрической проводимостью [2]. Таким образом, вблизи границы дневной стороны магнитосферы выполняется первое обязательное условие для пересоединения магнитных силовых линий. Вторым условием для развития процесса пересоединения является существование антипараллельных магнитных полей, которое выполняется при достаточно интенсивной составляющей ММП южного направления ( $B_z < 0$ ).

Наиболее вероятной областью пересоединения в переходной области магнитосферы является ее лобовая часть, т.е. окрестность критической точки. Считается, что после пересоединения в этой области пространства происходит эрозия границы, после чего поток плазмы солнечного ветра может беспрепятственно проникнуть во внутренние области магнитосферы. Результаты этого эффекта практически без запаздывания отображаются на течение внутримангнитосферных процессов, в частности, на интенсивность DR кольцевого тока [1]. Однако, возможна также и такая ситуация, когда после пересоединения энергетическое состояние магнитосферы не терпит особых возмущений, т.е. не является обязательным открытие канала, снабжающего магнитосферу дополнительным потоком частиц солнечного ветра. Такая ситуация фактически означает, что эрозия границы магнитосферы в результате пересоединения не является обязательным явлением. Это соображение косвенно подтверждается существованием порогового значения  $B_z < 0$ . Можно допустить, что пересоединение магнитных силовых линий происходит даже при слабом  $B_z$ , но при этом граница магнитосферы остается стабильной и ее

внутренние структуры не терпят дополнительное возмущение. Для подтверждения справедливости такого соображения воспользуемся топологическим формализмом, в рамках которого процесс пересоединения можно достаточно просто описать при помощи особенностей алгебраических кривых, аппроксимирующих границу поверхности дневной стороны магнитосферы.

Введем прямоугольную пространственную систему координат, начало которой совместим с центром эллипсоида вращения, отождествляемого с дневной стороной невозмущенной магнитосферы. Совместим плоскость  $xoz$  с плоскостью центрального меридионального сечения магнитосферы. Ось  $x$ , на котором расположена одна из малых осей эллипсоида, направлена на Солнце, т.е. Земля и критическая лобовая точка магнитосферы расположены в крайних точках этой полуоси, а контур сечения эллипсоида совпадает с центральной граничной силовой линией геомагнитного поля (рис.1).

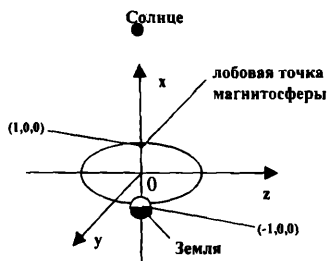


Рис.1. Центральное меридиональное сечение дневной стороны магнитосферы

Единицей длины примем длину малых полуосей в направлении  $x$  и  $y$ , которые для простоты будем считать равными. Величина большой полуоси эллипсоида, направленной вдоль  $z$ , будет зависеть от степени сплюснутости дневной стороны магнитосферы, которая будет описываться уравнением

$$A(x, y, z) = x^2 + y^2 + az^2 - 1 = 0, \quad (1)$$

где  $a < 1$  - обратная величина квадрата большой полуоси эллипсоида.

Для простоты, нижеследующие рассуждения будут проводиться для контура  $F(x, 0, z)$ , который формально является кривой, соответствующей  $y$  компоненте вектор-потенциала геомагнитного поля.. Это означает, что  $x$  и  $z$  компоненты напряженности геомагнитного поля на границе магнитосферы будут определяться из выражений

$$H_x = -H_0 \frac{\partial F}{\partial z}, \quad H_z = H_0 \frac{\partial F}{\partial x}, \quad (2)$$

где  $H_0$  - характерная величина напряженности геомагнитного поля на границе магнитосферы, определяемая из дипольной модели,  $x$  и  $z$  - безразмерные величины, нормированные на длину малой полуоси эллипсоида, аппроксимирующего дневную сторону магнитосферы.

Обычно, процессу пересоединения на границе магнитосферы предшествует возрастание динамического давления солнечного ветра. Следовательно, должен измениться аналитический вид кривых, аппроксимирующих границу дневной стороны магнитосферы. Естественно считать, что эти новые кривые сохраняют подобие с первоначальными кривыми, являющимися эллипсами.

Существует определенный произвол в выборе аналитического вида новых кривых. Для нашего анализа, кроме сохранения подобия с эллипсом, является существенным выполнение следующего дополнительного условия, которому должны подчиняться новая центральная кривая а также, возможно, и другие кривые, расположенные вблизи нее

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\partial F}{\partial z} = 0, \quad \text{при } x = 1, z = 0. \quad (3)$$

С физической точки зрения, исходя из (2), условие (3) означает аннигиляцию магнитного поля в лобовой точке магнитосферы, что обязательно должно происходить перед пересоединением силовых линий ММП и геомагнитного поля либо в некоторой точке, либо в определенной области пространства. То, что в наших рассуждениях выполнение условия (3) востребовано лишь в одной точке, не ограничивает общность задачи. Действительно, если условию (3) будет удовлетворять семейство кривых, расположенных вблизи центральной кривой, то вместо одной точки будем иметь линию пересоединения вдоль  $u$ . Отметим одно дополнительное обстоятельство: для наших рассуждений не является существенным, каким образом произошла аннигиляция магнитного поля. В принципе, этот эффект возможен не только при достаточно интенсивной южной компоненте ММП, но также и из-за особой топологии магнитного поля в основании модельной застойной зоны перед магнитосферой. Согласно [2] эта модель допускает возможность аннигиляции геомагнитного поля вблизи критической точки магнитосферы.

Из теории алгебраических кривых известно, что точка, в которой выполняется условие (3), является особой точкой кривой, в зависимости от величины

$$\text{выражения: } \Delta = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} - \left[ \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial z} \right]^2 \quad [3]. \quad \text{В общем случае, кривая второго порядка}$$

может иметь три типа особых точек: а) особая точка, в которой кривая пересекает сама себя, т.е. имеет истинный узел ( $\Delta < 0$ ); б) точка, в которой кривая имеет клюв ( $\Delta = 0$ ); в) изолированная особая точка, не принадлежащая кривой, т.н. мнимый узел ( $\Delta > 0$  - рис.2). Очевидно, что реализация математически возможных вариантов особой точки связана с физической целесообразностью, исходя из которой потребуем, чтобы новая центральная кривая в особой точке (критическая точка магнитосферы) имела истинный узел.

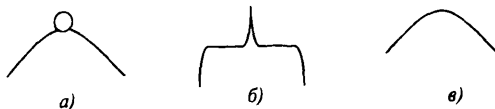


Рис.2. Особые точки алгебраической кривой второго порядка  
 а) истинный узел; б) клов; в) мнимый узел.

Из многообразия кривых, подобных эллипсу, выберем пробную кривую, удовлетворяющую условиям (1) и (3) и достаточно хорошо аппроксимирующую экспериментальный контур центрального меридионального сечения дневной стороны невозмущенной магнитосферы

$$F(x, z) = x^2 - 2x - 2 \cos \pi x + 0,7z^2 - 1 = 0 \quad (4)$$

Критерием существования истинного узла в особой точке кривой является неравенство [3]

$$\Delta = \frac{\partial F}{\partial x} \frac{\partial F}{\partial z} - \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} < 0, \quad (5)$$

которому действительно удовлетворяет кривая (4) в точке (1,0).

Таким образом, следует, что в критической точке магнитосферы при аннигиляции геомагнитного поля формально возможно появление такой магнитной конфигурации, которая будто бы являлась невозможной без явного включения силовых линий ММП в окончательную топологическую картину поля. Этот результат показывает что аннигиляция и пересоединение магнитных силовых линий не являются различными процессами, но, скорее всего, они грани одного физического феномена, которые в отдельных случаях невозможно различать. Кроме того, эти процессы не должны в обязательном порядке приводить к эрозии границы магнитосферы и открытию нового энергетического канала солнечный ветер-магнитосфера. Что касается характерного размера истинного узла в лобовой точке магнитосферы, то этот параметр в нашем формализме является произвольной величиной. Однако, исходя из факта экранирования геомагнитного поля плазмой солнечного ветра, размер узла в направлении оси  $x$  не должен превосходить толщину магнитопаузы (рис.3).

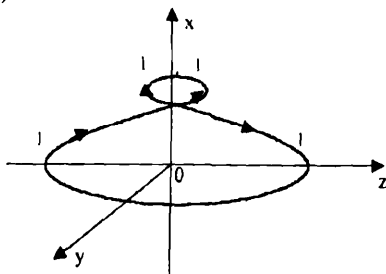


Рис.3. Неявная схема пересоединения  
 1-центральная граничная силовая линия геомагнитного поля

Для анализа случая, когда в результате пересоединения силовых линий ММП и геомагнитного поля возникает новый энергетический канал, снабжающий магнитосферу частицами солнечного ветра, необходимо к процессу аннигиляции в явном виде подключить силовые линии ММП. Для этого достаточно постулировать, что кривая, соответствующая силовой линии ММП, приходящей в критическую точку магнитосферы, имеет в этой точке особенность типа а) или б). Мы ограничиваемся качественным рассмотрением эффекта пересоединения, поэтому, как и при выборе новой кривой  $y$  составляющей вектора-потенциала геомагнитного поля, существует произвол и при выборе аналитического вида кривой, соответствующей силовой линии ММП. Для наглядности, удобно воспользоваться одним из вариантов кривой типа полukuбической параболы, например:

$$\Phi = -bz^3 + x^2 - 2x + 1 = 0, \quad (6)$$

где  $b < 1$ .

Иллюстрация сшивания кривой (6), имеющей в точке  $(1,0,0)$  особенность типа клюва, например: при  $b = 0.05$ , с кривой (4), дана на рис.4.

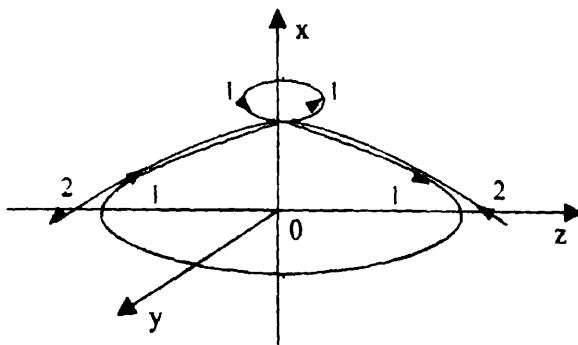


Рис.4. Явная схема пересоединения.

1. Центральная граничная силовая линия геомагнитного поля ;
2. Силовая линия солнечного ветра.

Как видно, выбранное нами одна из ветвей параболы (6) хорошо аппроксимирует снос силовой линии на перифериях переходной области, из за торможения ее центральной части вблизи лобовой точки магнитосферы.

В заключении еще раз отметим, что результаты нашей интерпретации обсуждаемого физического явления, систематически происходящего на границе дневной стороны магнитосферы, являются лишь качественными. Однако, представляется, что использованный математический формализм, в случае большего физического наполнения, вполне может составить основу для дальнейших исследований.

1. М.Н.Пудовкин, В.С. Семенов. Теория пересоединения и взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой Земли. М., Наука, 1985, 124 с.
2. З.А.Керселидзе. МГД эффекты конечной электрической проводимости солнечного ветра вблизи магнитосферы Земли. Тбилиси, из-во ТГУ, 1986, 122 с.
3. Р.Уокер. Алгебраические кривые. М., ИЛ, 1952, 369 с.

მაგნიტური ძალწირების გადაერთების მოვლენა  
მაგნიტოსფეროს შუბლა არეში ტოპოლოგიური ფორმალიზმის  
ჩარჩოებში

ზ. კერსელიძე, მ. ჩხიტუნიძე, ნ. ლეკიშვილი

რეზიუმე

მაგნიტოსფეროს შუბლა არეში საპლანეტათაშორისო მაგნიტური ველისა და გეომაგნიტური ველის სასაზღვრო ძალწირების გადაერთების მოვლენის მოდელირებისათვის გამოყენებულია ალგებრული მრუდების თეორია. გადაერთების შემდეგ მიღებული მაგნიტური ველის ტოპოლოგიური სურათის მიხედვით, სავალდებულო არ არის მაგნიტოსფეროს საზღვრის ეროზია და მისი შიდა სტრუქტურების შეშფოთების გამომწვევი ენერგეტიკული არხის გახსნა.

**Reconnection phenomenon of magnetic force lines in frontal  
area of magnetosphere within framework of topological formalism**

Z. Kercselidze, M. Chkhitunidze, N. Lekishvili

**Abstract**

To model the phenomenon of reconnection of interplanetary magnetic field and geomagnetic field boundary force lines in frontal area of the magnetosphere, algebraic theory of curves is used.

Topological picture after reconnection shows that erosion of magnetosphere's boundary and opening of it's internal structure, disturbing energetic channels, are not necessary.