

კ ვOPOCY CАMOPEГУЛЯЦИИ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Хантадзе А.Г., Кереселндзе З.А., Чхитунидзе М.С.

Институт геофизики им. М.Нодиа, 0193, Тбилиси, ул. Алексидзе №1

В спокойных и мало возмущенных условиях среда в плазмосфере, главным магнитосферном резервуаре, достаточно строго представляет собой практически идеальную, бесконечно проводящую плазму. Этим качеством она подобна солнечному ветру в межпланетном пространстве, в котором вморожено магнитное поле (ММП). Следовательно, при описании динамики этих субстанций в первом приближении можно пользоваться уравнениями идеальной магнитной гидродинамики, т.е. не вводить диссипативные параметры в виде феноменологических коэффициентов обычной и магнитной вязкостей. Однако, естественно возникают вопросы: насколько такой подход является корректным? Возможна ли без явного привлечения диссипативных коэффициентов саморегуляция в магнитосфере Земли? Для ответа на эти вопросы в настоящей работе рассматривается именно такой физический механизм, основанный на физической аналогии между внутримангитосферными и гидродинамическим процессами в земной атмосфере.

Известно, что во время рекуррентных магнитных возмущений (магнитная буря, суббуря), следующих за солнечной вспышкой, магнитосфера вследствие пограничных эффектов МГД взаимодействия геомагнитного поля с солнечным ветром, получает энергетический импульс, выводящий ее из состояния относительного равновесия. Релаксация следствия такого импульса может продолжаться достаточно долго, но магнитосфера опять обязательно придет к состоянию равновесия, когда интенсивность внутримангитосферных процессов будет поддерживаться на стационарном уровне [1]. С первого взгляда может показаться, что имеем дело с парадоксальным явлением, когда в среде, в которой отсутствуют диссипативные факторы, происходит затухание динамических процессов. Очевидно, что для объяснения механизма саморегуляции магнитосферы, хотя бы во время ее возмущений, следует наделить магнитосферную плазму диссипативными свойствами, что обычно делается при помощи феноменологического коэффициента магнитной вязкости. Но этот параметр связан с электрической проводимостью среды, которая достаточно переменна и, строго говоря, должна быть определена на кинетическом уровне. Именно так определяется эффект аномального сопротивления солнечного ветра вблизи границы магнитосферы, приводящий к усилению квазивязкого взаимодействия между геомагнитным полем и солнечным ветром. Кроме этого, аномальное сопротивление также способствует развитию процесса пересоединения магнитных силовых линий геомагнитного поля и ММП, приводящего к эрозии границы магнитосферы [2]. Однако, как было сказано выше, кроме введения феноменологического коэффициента магнитной вязкости и эквивалентного ему коэффициента кинематической вязкости, для объяснения механизма саморегуляции магнитосферы существует также другой математически достаточно корректный путь.

Магнитосфера Земли перманентно подвергается воздействию солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. При спокойном солнечном ветре и ММП магнитосфера Земли находится в состоянии относительного, хотя неустойчивого равновесия. Обычно

магнитосфера в космическом пространстве располагается под углом относительно линии Солнце-Земля, который меняется в известных пределах. Поэтому, векторы скорости солнечного ветра \vec{V}_2 ММП \vec{B}_2 можно разложить на тангенциальную и нормальную к границе магнитосферы составляющие. Введем прямоугольную систему координат, начало которой располагается в подсолнечной точке дневной стороны магнитосферы, которая отлучается от обычно используемой лишь обозначением осей. В частности, ось x направлена вдоль граничной силовой линии геомагнитного поля, z - на Солнце, ось y - вдоль границы экваториального сечения магнитосферы. Будем считать, что обтекание магнитосферы является асимметричным и происходит в xoz плоскости, что, согласно численным экспериментам, в возмущенных условиях является наиболее вероятным [3]. Следовательно, скорость плазмы, являющаяся вблизи подсолнечной точки малой величиной по сравнению со скоростью солнечного ветра до взаимодействия с магнитосферой, будет иметь две составляющие: вдоль x и z . Вблизи подсолнечной точки, т.е. фокальной области, кривизна граничной поверхности магнитосферы пренебрежимо мала по сравнению с ее линейным размером. Поэтому, вектор напряженности геомагнитного поля \vec{B}_1 фактически имеет только одну составляющую B_{1x} . Однако, вектор межпланетного магнитного поля \vec{B}_2 должен быть двухкомпонентным, т.е. имеем B_{2x} и B_{2z} .

Т.к. для вмороженного в солнечный ветер межпланетного магнитного поля практически всегда выполняется условие $|B_2| \ll |B_1|$, можно считать, что магнитное воздействие на магнитосферу со стороны ММП должно носить характер малых возмущений.

Если допустить, что плотность плазмы ρ и суммарное магнитное поле на границе магнитосферы $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$ являются однородными, линеаризованная система магнитогидродинамических уравнений, описывающая взаимодействие солнечного ветра с геомагнитным полем в приближении малых возмущений, будет иметь вид

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -\nabla P' + \frac{1}{4\pi} (\vec{B} \nabla) \vec{b}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{b}}{\partial t} = (\vec{B} \nabla) \vec{V}, \quad (2)$$

$$\text{div} \vec{V} = 0, \quad \text{div} \vec{b} = 0, \quad (3)$$

где \vec{V} - скорость плазмы, $P' = P + \frac{(\vec{B} \vec{b})}{4\pi}$ - полное давление, являющееся суммой газокINETического и магнитного давлений, \vec{b} - возмущенное магнитное поле.

Покажем, что как на границе магнитосферы, так и внутри нее, наличие нормальной составляющей ММП вызывает в среде своеобразную стратификацию и придает ей диссипативный характер, ввиду чего при рекуррентных магнитных возмущениях будет включаться механизм саморегуляции магнитосферы. Считается, что когда магнитосфера является непроницаемой для частиц солнечного ветра, т.е. ее граница не подвержена эрозии, (т.н. закрытая магнитосфера), система (1)-(3) имеет лишь одну собственную частоту, соответствующую поперечным волнам Альвена. Действительно, эти волны имеют недиссипативную природу, т.е. распространяются практически без затухания. Однако, такое представление является не вполне корректным, если существует нормальная компонента ММП, проходящая вглубь магнитосферы без скачка. При учете эффекта ММП, приводящего не только к пересоединению силовых линий геомагнитного поля и межпланетного магнитного поля, но также и к проникновению магнитного потока в плазмосферу (при наличии нормальной составляющей ММП), магнитосфера становится открытой. Поэтому

(аналогично действию ветра на поверхности воды) на ее границе возмущения будут носить характер поверхностных волн $\sim \exp(-kz) \exp(i\omega t + ikx)$, где ω - частота, \bar{k} - волновое число.

При таких условиях из системы (1)-(3) получим

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -\nabla P' + \frac{(\vec{\nabla} \bar{V})^2}{i4\pi\omega} \cdot \vec{V}, \quad (4)$$

$$\text{div} \vec{V} = k_x i V_x - k_z V_z = 0, \quad (5)$$

где $(\vec{\nabla} \bar{V}) = B_x \frac{\partial}{\partial x} + B_z \frac{\partial}{\partial z} \sim ik_x B_x - k_z B_z$, где $B_x = B_{x1} \pm B_{x2}$ (\pm в зависимости от ориентации \vec{B}_2), $B_z = B_{z2}$.

Используя уравнение неразрывности (5) и упрощающее условие $k_x = k_z = k$, не являющееся сильным ограничением, будем иметь: $iV_x = V_z$, $-V_x = iV_z$, вследствие чего компоненты уравнения (4) можно представить следующим образом:

$$\rho \frac{\partial V_x}{\partial t} = -\frac{\partial P'}{\partial x} - 2\Omega_y \rho V_z - \beta \rho V_x, \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial V_z}{\partial t} = -\frac{\partial P'}{\partial z} + 2\Omega_y \rho V_x - \beta \rho V_z, \quad (7)$$

где $2\Omega_y = k^2 \frac{B_x^2 - B_z^2}{4\pi\omega\rho}$, $\beta = k^2 \frac{B_x B_z}{2\pi\omega\rho}$.

Введем двумерные векторы:

$$\vec{u} = V_x \vec{e}_x + V_z \vec{e}_z, \quad \vec{G} = -\left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial P'}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P'}{\partial z} \vec{e}_z \right) i2\vec{\Omega} = 2\Omega_y \vec{e}_y,$$

После чего уравнение (4) примет вид

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = \rho \vec{G} + \rho [\vec{u} \cdot 2\vec{\Omega}] - \beta \rho \vec{u}. \quad (8)$$

Уравнение (8) по форме точно совпадает с уравнением движения атмосферы Гулдберга-Монина [4], которое учитывает действие сил барического градиента \vec{G} и Корриолиса $\vec{F}_k = \rho [\vec{u} \cdot 2\vec{\Omega}]$, а также аналог силы «релеевского» трения $\vec{F}_{kr} = -\beta \rho \vec{u}$.

В уравнении (8) общее выражение силы пропорционально скорости \vec{u} и имеет вид

$$\vec{F} = \rho [\vec{u} \cdot 2\vec{\Omega}] - \beta \rho \vec{u}. \quad (9)$$

Выражение (9) можно представить следующим образом: $\vec{F} = -(i2\Omega_y + \beta) \rho \vec{u} = -\alpha \rho \vec{u}$. Последнее выражение в скалярной форме совпадает с последними членами уравнений (6) и (7).

Теперь опишем процесс затухания возмущения с энергетической стороны.

Как известно, средняя объемная диссипация кинетической энергии $E_k = \int \frac{\rho u^2}{2} dV$ в магнитосферной плазме, как и в обычной несжимаемой среде, определяется средним

значением произведения силы F и скорости u . При этом, разумеется, следует пользоваться вещественными частями u и F :

$$u = \frac{1}{2}(u_0 e^{-i\omega t} + u_0^* e^{i\omega t}); F = -\frac{1}{2}(u_0 \alpha e^{-i\omega t} + u_0^* \alpha^* e^{i\omega t}), \quad (10)$$

Где индекс * означает сопряженную величину, u_0 - амплитуда скорости.

Учитывая, что среднее от $e^{\pm 2i\omega t}$ равно нулю, средняя диссипируемая в единицу времени энергия определяется выражением

$$\bar{E}_{кин} = \overline{F \cdot \rho u} = -\frac{1}{4}(\alpha + \alpha^*) \rho |u_0|^2 = -\frac{\beta}{2} \rho |u_0|^2. \quad (11)$$

Таким образом, диссипация энергии связана только с вещественной частью параметра α . Поэтому соответствующую (пропорциональную скорости) часть силы трения $\sim \beta \rho \dot{u}$ можно назвать диссипативной силой. Вторую же часть силы \bar{F} , пропорциональную мнимой части α и определяющую гироскопическую силу $\rho[\bar{u} \cdot 2\vec{\Omega}]$, не связанную диссипацией энергии, можно считать инерционной силой [4].

Т.к. $\beta = k^2 \frac{(B_x B_{z2})}{2\pi \omega \rho}$, можно заключить, что процесс затухания (саморегуляции)

движения плазмы вблизи границы магнитосферы, безусловно передающийся также и ее главному внутреннему плазменному резервуару (плазмосфера), можно объяснить существованием нормальной компоненты межпланетного поля B_{z2} . Все выражения, приведенные выше, справедливы также для плазмосферы. Однако, в этом случае для математической корректности следует начало системы координат поместить в подсолнечной точке плазмосферы. Таким образом, для открытой магнитосферы B_{z2} компонента свободно проходит в плазмосферу, где препятствует движению плазмы вдоль оси x , вследствие чего определенная доля кинетической энергии затрачивается на работу против сил магнитного «сопротивления» $\bar{F}_{mp} = -\beta \rho \dot{u}$. В случае отсутствия этой компоненты ММП диссипативные свойства магнитосферной плазмы, приводящие к саморегуляции магнитосферы, исчезают и остается лишь движение типа инерционных волн, обусловленное гироскопической силой $\bar{F}_k = \rho[\bar{u} \cdot 2\vec{\Omega}]$.

Заметим, что при учете натяжения магнитных силовых линий, подобно поверхностному натяжению жидкой пленки, система (1)-(3) приводит к дисперсионному уравнению, дающему комплексную частоту для поверхностных волн. В таком случае мнимая часть ω определяет величину коэффициента затухания возмущений во времени. При этом, как и в случае пренебрежения магнитным натяжением, затухание зависит от величины B_z компоненты ММП.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Нишида. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М., «Мир», 1980, 299 с.
2. В.А.Липеровский, М.И.Пудовкин. Аномальное сопротивление и двойные слои в магнитосферной плазме. М., «Наука», 1983, 179 с.
3. Dorelli J.C., Hesse M., Kuznetsova M.M., Rastatter L. A new look at driven magnetic reconnection at the terrestrial subsolar magnetopause. J. of Geophys. Res., vol. 109; A 12216, doi: 10.1029/2004JA010458.
4. А.Г.Хантадзе. Некоторые вопросы динамики проводящей атмосферы. Изд. «МЕЦНИЕРЕБА», Тбилиси, 1973. 279 с.

ხანთაძე ა., კერესელიძე ზ., ჩხიტუნიძე მ.

რეზიუმე

ნაჩვენებია, რომ მკვდ განტოლებათა სისტემაში მაგნიტური სიბლანტის ფენომენოლოგიური კოეფიციენტის შემოყვანის გარდა არსებობს აგრეთვე სხვა გზაც რეკურენტული გეომაგნიტური შეშფოთებების დროს მაგნიტოსფერული პლაზმის თვითრეგულაციის ასახსნელად. ასეთი მოსაზრება ეფუძნება ფიზიკურ ანალოგიას სითხის თავისუფალ ზედაპირზე ტალღური შეშფოთებების დისიპაციურ ეფექტსა და პლაზმის მოძრაობის "მაგნიტურ" დამუხრუჭებას შორის, რომელსაც იწვევს მზის ქარში მაგნიტოსფეროს საზღვრის მიმართ სპლანეტათა შორისო მაგნიტური ველის ნორმალური კომპონენტის არსებობა.

К вопросу саморегуляции магнитосферы Земли

Хантадзе А.Г., Кереселидзе З.А., Чхитунидзе М.С.

Реферат

Показано, что кроме введения феноменологического коэффициента магнитной вязкости в систему МГД уравнений, существует также другой путь для объяснения саморегуляции магнитосферной плазмы во время рекуррентных геомагнитных возмущений. Такое утверждение обосновано физической аналогией между диссипативным эффектом волновых возмущений на свободной поверхности жидкости и эффектом «магнитного» торможения движения плазмы из-за наличия в солнечном ветре нормальной к границе магнитосферы компоненты межпланетного магнитного поля.

To the question of self-control of a magnetosphere of the Earth

Khantadze A., Kereselidze Z., Chkhitunidze M.

Abstract

It is shown that except introduction of phenomenological factor of magnetic viscosity in system MGD of the equations, there is also other way for a self-control explanation of magnetosphere plasma during recurrent geomagnetic disturbances. Such statement is proved by physical analogy between dissipation effect of wave disturbances on a free surface of a liquid and effect of "magnetic" braking of plasma's motion because of presence in a solar wind normal component of the Interplanetary Magnetic Field.