

---

---

## К ВОПРОСУ «ДИНАМО» - ЭФФЕКТА В ЗАСТОЙНОЙ ЗОНЕ ПЕРЕД МАГНИТОСФЕРОЙ

<sup>1</sup> Чхитунидзе М.С., <sup>2</sup> Габисония И.А., <sup>3</sup> Жожиладзе Н.И.

<sup>1</sup> *Институт геофизики им. М.З.Нодиа, 0193, Тбилиси, ул. М. Ахвешидзе. 1. [www.gqs.org.ge](http://www.gqs.org.ge)*

<sup>2</sup> *Сухумский гос. университет-[www.sou.ge](http://www.sou.ge)*

<sup>3</sup> *Телавский гос. университет им. Я.Гогобенишвили*

В задаче обтекания магнитосферы солнечным ветром существует проблема критической точки магнитосферы, которую можно избежать, если воспользоваться формализмом застойной зоны. Ниже рассматривается модельная задача, целью которой является исследование возможной магнитной структуры застойной зоны, которая складывается в результате сугубо нестационарного процесса, имеющего место в пределах линейного масштаба центральной части переходной области между фронтом ударной волны и границей магнитосферы. Эту структуру, которая включает пространство вблизи критической точки магнитосферы, можно отождествить с застойной зоной Чаплыгина. Проблема ее устойчивости имеет два аспекта:

1. устойчивость застойной зоны, как крупномасштабного гидродинамического образования во время возмущений параметров солнечного ветра;
2. возмущения магнитной структуры застойной зоны и проблема ее топологического равновесия.

Согласно критерию устойчивости МГД тангенциального разрыва, который использовался в работе [1], параметрами, определяющими стабильность границы застойной зоны, являются: межпланетное магнитное поле (ММП), скорость солнечного ветра и его плотность до взаимодействия с магнитосферой. Поэтому, вышеуказанный первый вопрос в определенной степени связан со вторым, поскольку эволюция магнитного поля внутри застойной зоны может повлиять на устойчивость границы застойной зоны. Что касается проблемы топологического равновесия магнитной структуры застойной зоны, в отличие от вопроса устойчивости ее границы, для нее не существует какого-либо твердого математического критерия. Причину этого следует искать не только в грубости приближения застойной зоны, хотя при строгом подходе она больше является математической абстракцией, заменяющей гидродинамический фокус магнитосферы, чем полноценной физической аналогией реальной гидродинамической структуры вблизи критической точки. Кроме того, существует общая топологическая проблема, связанная с устойчивостью магнитных конфигураций в плазменной среде, т.е. как для лабораторной, так и для космической плазмы.

Для задачи ламинарного обтекания в приближении гидродинамического пограничного слоя среди различных теоретических вариантов возможной конфигурации «эффективного клина» магнитосферы, т.е. застойной зоны, теоретически физически приемлемы три конфигурации линий тока: седловой узел с неустойчивым плоским узлом, седловая звезда с неустойчивой плоской звездой и седловая спираль с неустойчивым плоским фокусом [1]. Два первых случая без противоречия соответствуют простой топологии магнитного поля в виде концентрических магнитных петель на границе застойной зоны с центром на оси

симметрии. При этом сила Ампера  $F = \frac{1}{c} [\vec{j} \vec{B}] \neq 0$ . С первого взгляда представляется, что для

конфигурации типа седловой спирали ситуация должна быть иной. Действительно, такая структура является бессиловой и ее можно считать суперпозицией двух типов магнитных полей, если рассматривать случай, когда линии тока плазмы и силовые линии межпланетного магнитного поля являются параллельными. Однако оказывается, что в определенных условиях суперпозиция двух бессиловых полей, подобно силовым полям, может быть устойчивой. Этот факт может иметь особое значение для развития т.н. турбулентного «динамо-эффекта» внутри застойной зоны, связанного со спиральностью гидродинамического поля скоростей в плазме.

Первоначально рассмотрим вопрос: каким образом складывается спиральная магнитная структура путем суперпозиции двух силовых полей? Такая задача является классическим примером магнитной гидростатики [2]. Условие отсутствия магнитной силы в неоднородном поле ( $\text{rot} \vec{B} \neq 0$ ) означает, что электрический ток направлен вдоль силовых линий магнитного поля, т.е.  $\text{rot} \vec{B} = \alpha \vec{B}$ , где  $\alpha$  - скалярная величина, которая может быть зависима от координат. С другой стороны это означает, что в неоднородном поле, для которого  $\text{grad} B^2 \neq 0$ , но сила Ампера  $F_a = 0$ , силы магнитного давления и магнитного натяжения должны быть взаимно компенсированы. Такое поле создает, например, магнитный диполь, который, кроме Земли, имеют и некоторые другие космические объекты. Что касается спирального поля, то оно наиболее простым образом может быть получено путем сложения магнитного поля прямолинейного тока и параллельного ему пучка магнитных силовых линий. Прямолинейный ток создает магнитные кольца с центром на оси тока, в которых, из-за действия силы магнитного натяжения, возможны перемещения в радиальном направлении. В отличие от колец, в пучке параллельных силовых линий действует только магнитное давление, направленное в сторону расширения пучка. Если при суперпозиции этих, различных по топологии, полей будет соблюдаться условие равенства градиента магнитного давления и силы магнитного натяжения, то форма суммарного поля будет спиральной и полная магнитная сила будет равна нулю. Действительно, согласно [2], составляющие суммарного бессилового поля в цилиндрической системе координат имеют вид:  $B_z = A I_0(\alpha r)$ ,  $B_\phi = A I_1(\alpha r)$ ,  $B_r = 0$ , где  $I_0$  и  $I_1$  - модифицированные функции Бесселя, а  $\alpha$  и  $A$  - постоянные. Т.к. на оси симметрии цилиндра ( $r = 0$ ) выполняются условия  $I_0(\alpha r) = 1$  и  $I_1(\alpha r) = 0$ , то очевидной становится топология суммарного бессилового магнитного поля: в центре аппроксимационного цилиндра силовые линии параллельны его оси, но с увеличением  $r$  постепенно возрастает их наклон, пока поле не примет практически азимутальное направление.

Приведенный пример, который является справедливым только при допущении цилиндрической симметрии, достаточно удовлетворительно соответствует магнитной конфигурации, имеющей топологию, подобную седловой спирали. Однако, следует учесть, что, в отличие от цилиндра, для которого любое сечение, перпендикулярное его оси, дает одинаковую картину, для седловой спирали будет соблюдаться лишь условие топологического подобия. Это означает, что для этой конфигурации параметр, характеризующий степень спиральности магнитного поля должен быть максимальным в области основания седловой звезды, в отличие от цилиндра, для которого максимум достигается в сечении, соответствующем срединной точке на его оси симметрии. Кроме рассмотренного классического примера, качественно поясняющего один из путей создания спиральной магнитной структуры, можно также воспользоваться результатами работы [3]. В ней был использован формализм многократного расщепления силовой линии магнитного поля в т.н. нерегулярной особой точке, с которой отождествлялась макушка застойной зоны. В приближении осевой симметрии, путем синтеза с моделью концентрических магнитных

петель, была получена формула для шага магнитного винта, возникающего на поверхности застойной зоны

$$L = 2\pi n(h_0 + |z|)^{-1/2} |z|^{3/2} \quad (1)$$

где  $n = B_0 / B_\phi$ ,  $h_0$  – высота застойной зоны,  $B_0$  – характерная величина магнитного поля. Из (1) следует, что шаг винта  $L$  является переменным и показывает, что первоначальная тороидальная структура магнитного поля максимально искажается в области основания застойной зоны, где  $L_{max} = \sqrt{2\pi n h_0}$  и силовые линии фактически создают полоидальную магнитную структуру.

Для существования «динамо-эффекта» принципиальным является допущение, что внутри застойной зоны можно пренебречь скоростью гидродинамического движения плазмы. Однако, т.к. абсолютная неподвижность заряженных частиц солнечного ветра в неоднородном магнитном поле исключается, следует количественно оценить справедливость указанного допущения. Для этого главным критерием является соотношение гидродинамической скорости к скорости электромагнитного дрейфа в плазме. Эта задача рассматривалась в работе [4], в которой была принята во внимание «двухкомпонентная» природа «медленных» движений плазмы, когда следует рассматривать независимо друг от друга движение протонов и электронов. Оказалось, что после аналитического решения уравнений двухкомпонентной магнитной гидродинамики, при условии пренебрежения инерцией электронов, обязательно приходим к следующему результату:

1. меняется условие «вмороженности» магнитного поля в плазме, означающее, что в области пространства перед магнитосферой постулат об идеальной электрической проводимости солнечного ветра и «вмороженности» в эту среду межпланетного магнитного поля (ММП) уже не является справедливым.

2. В плазме могут возникнуть вихревые движения, за которыми последуют локальные изменения магнитного поля.

Исходя из этих результатов, оказалось, что в протонную компоненту солнечного ветра вморожено не магнитное поле, а новый комбинированный вектор  $\vec{C} = \frac{Mc}{e} \text{rot} \vec{V}_p + \vec{B} = \text{const}$ , где  $M$  – масса протона,  $e$  – элементарный заряд,  $c$  – скорость света.

Таким образом, вследствие «медленных» движений в застойной зоне, характерная скорость которых значительно меньше скорости электромагнитного дрейфа, могут возникнуть вихри скорости, за увеличением которых последует ослабление локальных магнитных полей. Очевидно, что этот процесс должен быть обратимым, т.е. ослабление вихрей должно вызывать усиление магнитного поля, что качественно означает развитие «динамо»-эффекта. Однако, этот эффект без учета спиральности магнитного поля все же будет слабым. Действительно, в застойной зоне максимальная величина  $\Delta V_p$  не может превосходить  $V_d \approx 10 \text{ кмс}^{-1}$ , а минимальный линейный масштаб не может быть меньше ларморовского радиуса вращения протона, т.е.  $\frac{Mc}{e} \text{rot} \vec{V}_p \approx \frac{Mc}{e} \frac{\Delta V_p}{L} \approx 0,2 \text{ нТл}$ , что является

весьма малой величиной [4]. Поэтому, в застойной зоне может оказаться менее заметным усиление вихревого магнитного поля, по сравнению с увеличением уровня турбулизации плазмы, вызванной любой причиной, например, локальными изменениями основного магнитного поля, происходящими по причине изменения параметра спиральности. Очевидно, что усиление турбулизации, происшедшее таким путем, в застойной зоне должно иметь предел. Иначе, если изменения вектора  $\vec{B}$  достигнут значительной величины, может нарушиться условие двухжидкостного гидродинамического приближения.

Известно, что в плазме низкой плотности интенсификация турбулентного движения заряженных частиц является главной причиной ухудшения электрической проводимости [5].

Кроме того, малая инерция электронов, по сравнению с инерцией протонов, может быть вызвана разницей вязкостей электронной и протонной компонент плазмы, что не было учтено в работе [4]. Поэтому, несмотря на значительный качественный результат, на основе данной работы нельзя сделать твердого заключения о количественных показателях «динамо»-эффекта в застойной зоне. По этой причине представляется необходимой оценка справедливости применимости классической теории к магнитосферным условиям. Для этого можно воспользоваться уравнением магнитной индукции в статистической форме

$$\frac{\langle \delta \vec{B} \rangle}{\partial t} = \text{rot} [\langle \vec{V} \rangle \times \langle \vec{B} \rangle] + \alpha \text{rot} \langle \vec{B} \rangle + v_m \Delta \langle \vec{B} \rangle, \quad (2)$$

где символ  $\langle \rangle$  означает среднее,  $\alpha$  – псевдоскаляр, который является мерой спиральности турбулентного поля скоростей.

Параметр  $\alpha$  играет особую роль в теории турбулентного «динамо», поэтому, определение численного диапазона его изменения в конкретной магнитогидродинамической (МГД) задаче связано с выявлением корреляционных связей между компонентами векторного поля скоростей. Решение такой задача является очень сложной проблемой и, главное, требует морфологического анализа исследуемой гидродинамической структуры. Однако, в застойной зоне перед магнитосферой диапазон изменения параметра  $\alpha$  можно определить относительно просто, если воспользоваться линейными характеристиками застойной зоны и ее вероятной магнитной структурой.

Т.к. в застойной зоне гидродинамическая скорость плазмы, согласно идее Чаплыгина, является пренебрежимо малой по сравнению со скоростью солнечного ветра в межпланетном пространстве, в выражении (2) можно считать, что  $\langle \vec{V} \rangle \approx 0$ , а также, по причине использования приближения конечной электрической проводимости, можно снять символ усреднения перед магнитным полем. В статистическом приближении коэффициент магнитной вязкости, кроме эффекта джоулевой диссипации, зависит также и от турбулентного сопротивления, что в нашем случае неявно подразумевается. Поэтому, вместо (2) окончательно получим модифицированное уравнение диффузии магнитного поля, в котором присутствует член, соответствующий эффекту спиральности.

Согласно работе [6] конкретное модельное решение уравнения (2) удобно искать для фурье-компонент магнитного поля

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \vec{B}(k, t) \exp(i\vec{k}\vec{r}), \quad (3)$$

где  $\vec{r}$  – радиус-вектор в плоскости, перпендикулярной оси симметрии застойной зоны,

$K = \frac{2\pi}{\lambda}$  – волновое число, соответствующее генерированным в плазме турбулентным пульсациям. Величина этого числа меняется в определенном интервале, в зависимости от линейных масштабов вихрей скорости, определяющих длину волны  $\lambda$ . Следовательно, если воспользоваться представлением (3), уравнение в частных производных (2) преобразуется в обычное дифференциальное уравнение

$$\frac{d\vec{B}}{dt} = i\alpha [K\vec{B}] - K^2 v_m \vec{B}, \quad (4)$$

для которого начальным условием является уравнение неразрывности магнитного поля  $\text{div} \vec{B} = K\vec{B} = 0$ . Допустим, что  $\vec{K}$  имеет только  $z$  компоненту. Из уравнения неразрывности следует, что в любой, перпендикулярной к оси симметрии застойной зоны сечения, в прямоугольной системе координат могут существовать две компоненты магнитного поля  $B_x$  и  $B_y$ , для которых из (4) получим два скалярных уравнения

$$\frac{dB_x}{dt} = -iK\alpha B_y - K^2 v_m B_x, \quad (5)$$

$$\frac{dB_y}{dt} = iK\alpha B_x - K^2 v_m B_y, \quad (6)$$

решение которых удобно для представления

$$B_x = B_{0x} \exp^{n+ikz}, B_y = B_{0y} \exp^{n+ikz}, \quad (7)$$

удовлетворяющего уравнениям (5) и (6) лишь в том случае, если  $\gamma = K\alpha - K^2 v_m$ . Отсюда получим следующую связь между компонентами магнитного поля:  $B_x = -iB_y$ .

Представление (7) не противоречит выше упомянутым гидродинамическим конфигурациям застойной зоны. Однако, обязательно следует принять во внимание то обстоятельство, что уравнение (2) не описывает магнитную структуру застойной зоны полностью, но магнитное поле, возникшее вследствие конкретного вихря, генерированного из-за эффекта турбулентности. Поэтому, это поле, несмотря на присутствие в уравнении (2) члена, пропорционального  $rot \vec{B}$ , может быть бессловым.

Таким образом, знак параметра  $\gamma$  определяет характер изменений магнитного поля, генерированного в застойной зоне из-за турбулизации плазмы. В частности, существуют два варианта этих изменений во времени:

- 1)  $\gamma > 0$  — магнитное поле усиливается (турбулентный «динамо»-эффект).
- 2)  $\gamma < 0$  — магнитное поле ослабевает (сильная омическая диссипация).

Здесь является логичным возвращение к инварианту  $\vec{C} = \frac{Mc}{e} rot \vec{V}_p + \vec{B} = const$ , согласно

которому в первом случае со временем будет происходить ослабление вихрей скорости протонной компоненты, т.е. усиливающееся магнитное поле будет иметь стабилизирующее влияние на движение плазмы. Во втором случае будет возрастать уровень турбулизации плазмы. В реальности, будем иметь затухающий со временем нестационарный процесс, когда периодически будет происходить либо усиление магнитного поля, либо интенсификация вихревого движения. В конце концов, установится неустойчивое, но равновесное состояние, т.е. будет достигнуто состояние, которое будет контролироваться скоростью солнечного ветра и межпланетным магнитным полем.

Таким образом, магнитная вязкость плазмы солнечного ветра и  $\alpha$  эффект практически исключают существование такого решения уравнения (2), которое со временем может дать устойчивую стационарную магнитную конфигурацию. В том случае, когда  $\gamma > 0$ , этот параметр является декрементом колебаний магнитного поля, когда  $\gamma < 0$  — инкрементом, величина которого зависит от трех других параметров:  $K, v_m$  и  $\alpha$ . Диапазон изменений волнового числа  $K = \frac{2\pi}{\lambda}$  зависит от характерных линейных масштабов застойной зоны.

Максимальный по величине масштаб турбулентности будет равен радиусу основания застойной зоны, минимальный — ларморовскому радиусу вращения в магнитном поле частицы плазмы солнечного ветра. В обычных условиях, когда в солнечном ветре не развивается эффект аномального сопротивления, в лобовой области магнитосферы и на магнитopause  $K \approx [10^{-9} + 10^{-7}] \text{ см}^{-1}$  и  $v_m \approx 10^{11} + 10^{12} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$  [1]. Если воспользоваться условием  $\gamma > 0$ , при помощи вышеуказанных интервалов, из выражения  $\gamma = K\alpha - K^2 v_m$  можно определить ту предельную величину декремента колебаний, после достижения которой в застойной зоне будет возможно развитие положительного «динамо»-эффекта. Для этих интервалов параметров  $K$  и  $v_m$  параметр спиральности будет меняться в интервале  $\alpha = [10^2 + 10^5] \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ . Отсюда следует, что для «динамо»-эффекта, как минимум, является необходимой величина  $\alpha > 10^2 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ . Таким образом, приходим к значительному

результату: чем больше линейный масштаб турбулентного вихря, тем меньше эффективные величины параметров  $K, \alpha$ .

Положительный «динамо»-эффект в застойной зоне предположительно должен вызвать генерацию альвеновских волн, частотный спектр которых может отличаться от спектра таких же волн, но генерированных из-за возмущений магнитной поверхности застойной зоны. Волны Альвена, подобно ионно-циклотронной и ионно-акустической кинетической неустойчивостям, могут стать причиной развития аномального сопротивления в плазме солнечного ветра [5]. Этот эффект может способствовать образованию локального токового слоя вблизи критической точки магнитосферы. После распада этого слоя может измениться энергетический спектр плазмы, вследствие чего возрастет вероятность проникновения энергичных электронов из основания застойной зоны вглубь магнитосферы. Существование энергичных электронов в плазмосфере, которая является главным внутримангнитосферным резервуаром плазмы, необходимо для развития электронно-циклотронной неустойчивости, генерирующей очень низкочастотные и крайне низкочастотные электромагнитные волны.

Возвратимся к вопросу МГД устойчивости застойной зоны перед магнитосферой. Известно, что магнитные тела, созданные силовыми линиями, образующими конфигурации конечных размеров типа седловой звезды или седловой спирали, не могут быть топологически устойчивыми [7]. Однако, нельзя исключить, что топологически неустойчивые магнитные конфигурации будут оставаться равновесными, чего можно достичь в случае баланса между магнитными и гидродинамическими силами. Вообще, неустойчивые конфигурации обязательно эволюционируют, т.е. их равновесие является меняющимся во времени процессом. Здесь возможны различные варианты эволюции магнитного поля, которые допускают как разрывы силовых линий магнитного поля (приближение идеальной электрической проводимости), так и их пересоединение или аннигиляцию (приближение конечной электрической проводимости). В результате пересоединения, т.е. слияния магнитных силовых линий обычно образуется новая магнитная конфигурация. В монографии [7] даны примеры эволюции во времени различных магнитных структур. Они достаточно наглядно показывают различные этапы развития достаточно простых равновесных, но топологически неустойчивых, магнитных конфигураций. Именно развитие подобных структур нельзя исключить в застойной зоне, в основании которой, из-за диссипационных эффектов и уменьшения линейных масштабов магнитной конфигурации, возможно также появление токового слоя. Вблизи такого токового слоя может происходить пересоединение силовых линий его собственного магнитного поля с силовыми линиями, ограничивающими начальную магнитную конфигурацию. В результате может возникнуть такая топологическая картина, в которой, в отличие от первоначальной, будут присутствовать две новые магнитные конфигурации, изолированные друг от друга нейтральной линией. Со временем данная картина может развиваться по схеме, аналогичной предыдущей, и окончательно образовать такую магнитную структуру, которая будет соответствовать какой либо из трех магнитных конфигурации, удобных для аппроксимации застойной зоне в случае азимутальной симметрии.

#### Литература

1. Кереселидзе З.А. МГД эффекты взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли. ТГУ. 1986. 122 с.
2. Пикельнер С.Б. Основы космической электродинамики. Москва. 1961. 295 с.
3. Кереселидзе З.А., Кирцхалия В.Г., Чхитунидзе М.С., Хантадзе А.Г., Жонжолодзе Н.И., Габисония И.А. Топология магнитного поля и спектр МГД волн в застойной зоне перед магнитосферой Земли. *Georgian Engineering News*. 2007. №2. С.31-37.
4. Khantadze A.G., Kereselidze Z.A. On the Two-Fluid Nature of a Plasma near the Subsolar Point of the Magnetosphere. *Phys. Solariter.*, Potsdam. 1984. Vol. 23. PP.78-82.

# მაგნიტოსფეროს წინამდებარე მდგარ ზონაში "დინამო"-ეფექტის საკითხთან დაკავშირებით

ჩხიგუნძე მ., ი გაბისონია ი., უონჟოლაძე ნ.

## რეზიუმე

მაგნიტური ველის გაძლიერებას ("დინამო"-ეფექტი) გარდამავალი არის ფოკალურ ნაწილში, რომელიც გაიგივებულია ჩაპლიგინის მდგარ ზონასთან, ხელს უწყობს მზის ქარის მაგნიტური სიბლანტე. ამ ფაქტორისა და სტაგნაციის ზონის ხასოვანი მასშტაბის ცვლილების დიაპაზონის გათვალისწინებით დადგენილია მაგნიტური ველის ცვლილების დეკრემენტის არსებობისათვის აუცილებელი სპირალურობის პარამეტრის სიდიდის დიაპაზონი. ნაჩვენებია, რომ სტაგნაციის ზონის შემომსახურელი არამდგრადი მაგნიტური კონფიგურაციები "დინამო"-ეფექტის განვითარების შედეგად შეიძლება განიცდიდნენ დროში ევოლუციას, თუმცა მათი ტოპოლოგია ყოველთვის წონასწორული იქნება.

## К ВОПРОСУ «ДИНАМО»-ЭФФЕКТА В ЗАСТОЙНОЙ ЗОНЕ ПЕРЕД МАГНИТОСФЕРОЙ

Чхитунидзе М.С., Габисония И.А., Жонжолაძე Н.И.

### Реферат

Усилению магнитного поля («динамо»-эффект) в фокальной части переходной области, которая отождествляется с застойной зоной Чаплыгина, способствует магнитная вязкость солнечного ветра. С учетом данного фактора и диапазона изменений линейного масштаба застойной зоны, установлен диапазон величины параметра спиральности, необходимый для существования декремента изменения магнитного поля. Показано, что неустойчивые магнитные конфигурации, ограничивающие застойную зону, вследствие развития «динамо»-эффекта, могут эволюционировать во времени, однако их топология всегда будет равновесной.

# **“DYNAMO”-EFFECT IN STAGNATION ZONE IN FRONT OF THE MAGNETOSPHERE**

**Cbkhitunidze M., Gabisonia I., Zhonzholadze N.**

## **Abstract**

The increase of the magnetic field (“dynamo”-effect) in the focal part of the magnetosheath, which is identified with stagnation zone of Chaplign, supports magnetic viscosity of the solar wind plasma. A range of helicity parameter value necessary for existence of magnetic field alteration decrement has been determined taking into consideration the given factor as well as the range of the stagnation zone linear scale alteration. It has been revealed that non-stable magnetic configurations outlining the stagnation zone may undergo evolution by time as a result of “dynamo”-effect development; however, their topology picture will always be balanced.