

М. А. Волков

ДИПОЛИЗАЦИЯ МАГНИТНЫХ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ ЗЕМЛИ И ВЫСЫПАНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ИЗ МАГНИТНОЙ СИЛОВОЙ ТРУБКИ

Во время взрывной фазы суббури на ночной стороне магнитосферы наблюдается усиление магнитного поля и одновременно с этим уменьшение плазменного давления. Усиление магнитного поля регистрируется сначала в хвосте магнитосферы, затем на более близких расстояниях от Земли. Этот процесс длится несколько минут и охватывает область в магнитосфере ~10 радиусов Земли. Одно из возможных объяснений этого явления связано с охлаждением магнитных силовых трубок, вызванное высыпанием энергичных частиц в ионосферу. Осуществлены оценки эффективности данного механизма.

During the expansion phase of the substorm in the nightside magnetosphere enhancement of the magnetic field and decrease the plasma pressure is observed simultaneously. Enhancement of the magnetic field is recorded at first in the tail of the magnetosphere, and then at more closer distances from the Earth. This process takes a few minutes and covers the region in the magnetosphere of 10 Earth radii. One of possible explanations of this phenomenon is associated with cooling magnetic flux tubes caused by the precipitation of the energetic particles in the ionosphere. We have made evaluation of the effectiveness of this mechanism.



Ключевые слова: магнитосферная суббуря, диполизация магнитных силовых линий, высыпание заряженных частиц в дугах полярных сияний.

Key words: magnetosphere substorm, dipolarization of the magnetic field lines, precipitation of the particles above auroral arc.

Взрывная фаза магнитосферной суббури сопровождается усилением B_z компоненты магнитного поля в хвосте магнитосферы и уменьшением плазменного давления p . Этот процесс называется диполизацией магнитных силовых линий, он начинается в хвосте магнитосферы и за несколько минут охватывает область протяженностью ~ 10 RE (RE-радиус Земли), приближаясь к Земле со скоростью ~ 300 км/с [1]. Скорость распространения диполизации магнитных силовых линий больше альвеновской скорости, но заметно меньше магнитозвуковой и совпадает со скоростью электрического дрейфа плазмы в хвосте магнитосферы. Одно из возможных объяснений этого явления связано с образованием плазменных пузырей, давление плазмы в такой магнитной силовой трубке меньше фонового, а магнитное поле, наоборот, больше. Пузыри могут появляться при пересоединении в хвосте магнитосферы [2]. Пузырь связан с интенсивными вытекающим из ионосферы и втекающим в ионосферу токами [3]. Электрическое поле поперек такой структуры повышено, и пузырь движется к Земле. На ионосферном уровне должно наблюдаться движение этой структуры к экватору. В тоже время авроральные формы во время взрывной фазы суббури движутся не к экватору, а к полюсу. В настоящей работе предлагается объяснение диполизации магнитных силовых линий в хвосте магнитосферы неадиабатическим охлаждением магнитных силовых трубок вследствие высыпания заряженных частиц в ионосферу. Под высыпанием заряженных частиц подразумевается в первую очередь высыпание энергичных электронов.

Рассмотрим основные процессы в магнитной силовой трубке, связанной с дугой полярного сияния. Основной вклад в давление в трубке в плазменном слое дают ионы, энергия которых почти на порядок больше энергии электронов. В тоже время поток энергии высыпавшихся в ионосферу электронов значительно больше потока ионов, особенно над дугами полярных сияний или высыпаниями типа «перевернутого V». Энергия высыпавшихся электронов над дугами сияний достигает 10 кэВ, это значительно больше средней энергии электронов в плазменном слое и сравнимо со средней энергией протонов. Наиболее вероятным механизмом ускорения электронов над дугами полярных сияний является возникновение продольного электрического поля [4]. Кроме продольной компоненты электрического поля над дугой сияния имеется и поперечная компонента поля, которую можно обнаружить экспериментально [5]. На рисунке 1 показано возможное распределение электрического потенциала и токов над дугой сияния. В ионосфере токи текут по направлению электрического поля, а в магнитосфере — против электрического поля, то есть в магнитосфере расположен генератор электрического поля. Таким генератором выступают горячие магнитосферные ионы, которые перемещаются практически вдоль линий равного магнитного потенциала со скоростью градиентного дрейфа $V_{\text{гр}}$. Холодные электроны поперек магнитного



поля движутся вдоль линий равного электрического потенциала. Горячие ионы, направляясь против электрического поля, энергию теряют, а электроны, ускоренные продольной разностью потенциалов, ее приобретают. В результате передачи энергии от ионов к электронам и высыпания электронов в ионосферу магнитная силовая трубка охлаждается и опустошается. Давление в трубке уменьшается, а магнитное поле возрастает.

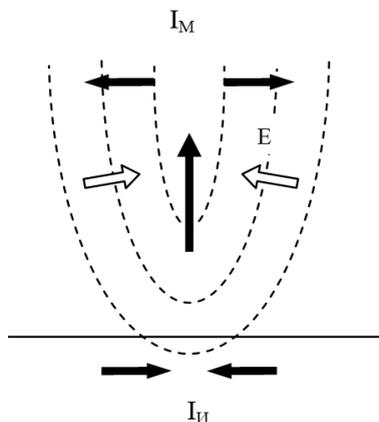


Рис. 1. Возможное распределение электрического потенциала и токов над дугой полярного сияния, штриховые линии проведены вдоль линий равного электрического потенциала, I_H — ток в ионосфере, I_M — ток в магнитосфере, белые стрелки показывают направление электрического поля

На рисунке 2 представлен поперечный дрейф горячих ионов в экваториальной плоскости магнитосферы в неоднородном магнитном поле. Магнитное поле на рисунке 2 направлено вверх. Горячие ионы двигаются вдоль изолиний магнитного поля со скоростью градиентного дрейфа $V_{ГР}$ и со скоростью электрического дрейфа V_E под действием электрического поля E . Изолинии показаны прямыми прерывистыми линиями, в действительности они сходятся в области большего по значению магнитного поля и расходятся в области меньшего поля. Линии равного электрического потенциала даны под некоторым углом к изолиниям магнитного поля. Электрический дрейф ионов направлен вправо (рис. 2).

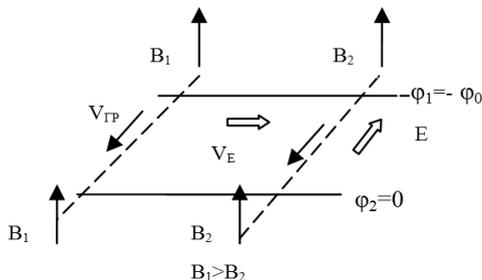


Рис. 2. Движение горячих магнитосферных ионов в экваториальной плоскости магнитосферы под действием градиентного $V_{ГР}$ и электрического V_E дрейфов. E — напряженность электрического поля. Изолинии магнитного поля показаны прерывистыми линиями



Под действием электрического поля ионы дрейфуют в область меньшего магнитного поля с индукцией B_2 . Поскольку магнитный момент ионов сохраняется, их энергия будет уменьшаться. Оценим возможное значение разности потенциалов в такой структуре электрического поля. Пусть магнитосферные ионы имеют магнитный момент μ , тогда полная энергия иона W_i равна

$$W_i = mv_{\parallel}^2/2 + \mu B + e\varphi, \quad (1)$$

где μB — поперечная энергия иона, φ — потенциал электрического поля. В выражении (1) опущены слагаемые, содержащие квадраты дрейфовых скоростей из-за их малости. Пусть индукция внутри трубки в центре дуги равна B_1 , потенциал $\varphi_1 = -\varphi_0$, вне дуги B_2 $\varphi_2 = 0$. Полная энергия иона (1) сохраняется в любой точке траектории частицы. При $B_1 > B_2$ кинетическая энергия иона в точке 2 становится меньше. Минимальное значение этой энергии не может быть меньше μB_2 в силу сохранения магнитного момента, продольная кинетическая энергия в этом случае равна нулю. Уменьшение кинетической энергии иона идет на поддержание электрического поля и ускорение электронов в ионосферу. Будем считать, что при $B = B_2$ точки отражения ионов лежат вдалеке от экваториальной плоскости, так как продольная разность потенциалов на этой магнитной силовой линии равна нулю. Тогда в силу второго адиабатического инварианта $I = v_{\parallel} l$, где v_{\parallel} — среднее значение скорости, l — длина магнитной силовой линии между точками отражения, среднее значение скорости $v_{\parallel 2}$ будет мало и им можно пренебречь. Из (1) получим выражение для потенциала φ_0 :

$$\varphi_0 = \mu(B_1 - B_2)/e + mv_{\parallel}^2/2 \quad (2)$$

Принимая $B_1/B_2 = 2,4$, $\mu B_1/2 = mv_{\parallel}^2/2 = 2,25 \text{ кэВ}$, получим значение $\varphi_0 \approx 5 \text{ кВ}$, достаточно близкое к наблюдаемым величинам. Изменение магнитного поля и значения поперечной энергии ионов взято из наблюдений на спутнике Themis (e) [1].

Оценим изменение концентрации внутри магнитной силовой трубки над дугой сияния. Считая магнитный момент электронов малым, связь между изменением концентрации и магнитным полем дается следующим приближенным выражением, полученным из уравнения баланса давлений с учетом постоянства магнитного момента ионов:

$$n_2 B_2 / B_{\text{cp}} - n_1 B_1 / B_{\text{cp}} = (B_1 - B_2) / \mu_0 \mu, \quad (3)$$

где $n_{1,2}$ — концентрация заряженных частиц внутри и снаружи магнитной силовой трубки, связанной с дугой, μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, $B_{\text{cp}} = (B_1 + B_2)/2$. Для ситуации, описанной в работе [1], из наблюдений на спутнике Themis (e) примем значения $B_1 = 35 \text{ нТл}$, $B_2 = 15 \text{ нТл}$, $\mu B_1 = 4,5 \text{ кэВ}$, $n_1 = 0,2 \text{ см}^{-3}$ уменьшение концентрации по формуле (3) составит $(n_2 - n_1) = 1,5 \text{ см}^{-3}$. Наблюдаемое значение изменения концентрации $\approx 1 \text{ см}^{-3}$. Расчетное отношение концентраций $n_2/n_1 \approx 8$, наблюдаемое ≈ 6 , эти значения заметно больше отношения энергий горячих ионов в соответствующих областях $\mu B_1/\mu B_2 \approx 2,4$. Поэтому давление в центре дуги меньше чем на ее краю, а магнитное поле больше. Выражение (3) получено при условии, что скорость распространения диполизационного фронта много меньше тепловой скорости ионов и даже альвеновской, а кривизна магнитной силовой линии много больше гирорадиуса иона.



Таким образом, в магнитной силовой трубке с вытекающим из ионосферы интенсивным током концентрация и давление магнитосферных частиц уменьшается из-за ухода из трубки горячих ионов и высыпания электронов в ионосферу. Уменьшение давления приводит к увеличению магнитного поля в силовой трубке, так как плазма является диамагнетиком. Увеличение магнитного поля, в свою очередь, вызывает появление вихревого электрического поля, которое приводит к сжатию магнитной силовой трубки и частиц, находящихся в ней. Давление в трубке изменяется и возникает новая конфигурация распределения давления и магнитного поля в хвосте магнитосферы.

Рассмотрим самосогласованное с магнитным полем распределение плазменного давления в хвосте магнитосферы вдоль линии Солнце – Земля (ось X) для двух случаев; в конце подготовительной фазы суббури и после процесса диполизации магнитных силовых линий. Магнитное поле в хвосте магнитосферы задается модельно, для этого используется модель магнитосферы Цыганенко 96 [6]. Давление вдоль магнитной силовой линии считаем постоянным. Влияние магнитосферной конвекции на распределение плазменного давления не учитывается, магнитные силовые трубки не дрейфуют. В этом случае коширота θ магнитной силовой трубки до и после диполизации не меняется и можно вычислить кинетическую энергию заряженных частиц в трубке $3/2pV$ и энтропию $S = pV^{5/3}$ до и после диполизации, где $V = \int_{z_0}^l dz / B$ – объем магнитной силовой трубки, имеющей единичный магнитный поток; интегрирование проводится от ионосферы z_0 до экваториальной плоскости магнитосферы l вдоль магнитной силовой линии. Уменьшение кинетической энергии и энтропии должно говорить о неадиабатичности происходящих процессов и высыпании энергичных частиц. Согласно наблюдениям [7] диполизация в хвосте магнитосферы и авроральный *breakup* наблюдаются почти одновременно и на одних и тех же силовых линиях.

В отсутствии конвекции (или когда скорость конвекции значительно меньше альвеновской или звуковой) уравнение баланса сил в плазме с магнитным полем имеет вид

$$-\mu_0 \nabla p + [\text{rot} B \times B] = 0, \quad (4)$$

где p – изотропное давление плазмы в магнитосфере, B – индукция магнитного поля.

В проекции на X (ось X направлена к Солнцу, Z – к полюсу) уравнение (1) принимает следующий вид:

$$\partial / \partial x (\mu_0 p + B_z^2 / 2) = B_z \partial / \partial z (B_x). \quad (5)$$

Уравнение (5) решается численно с использованием модели магнитного поля [6] с переменным шагом интегрирования. Узлы сетки интегрирования в экваториальной плоскости магнитосферы привязаны к постоянному шагу изменения кошироты θ магнитной силовой трубки на ионосферном уровне. Шаг изменения кошироты задается равным $0,005^\circ$. В данной модели величина тока в хвосте магнитосферы зависит от ММП и давления солнечного ветра. Для случая, предшествующего диполизации, принималось значение компоненты ММП $B_z = -5$ нТ, после $B_z = 0$ нТ, $B_y = 0$ в обоих случаях. Давление солнечного ветра 2 нПа,



$Dst = 0$. Давление в плазменном слое при $X = -20RE$ задавалось равным 0,5 нПа до и 0,25 нПа после диполизации, что близко к значениям, наблюдаемым на спутнике Themis (*b*) [1]. На рисунке 3 показано распределение B_z компоненты магнитного поля в магнитосфере до (1) и после диполизации (2) рассчитанное из модели магнитного поля. На рисунке 4 приведено распределение плазменного давления до (1) и после диполизации (2), полученное из решения уравнения (5). Усиление B_z компоненты магнитного поля происходит одновременно с уменьшением плазменного давления p . На рисунке 5 представлены графики распределения кинетической энергии заряженных частиц $3/2pV$ в магнитных силовых трубках в зависимости от кошироты θ до (1) и после диполизации (2). Поскольку коширота магнитной силовой трубки не меняется, из графиков нетрудно оценить изменение внутренней энергии в магнитной силовой трубке до и после диполизации. Из графиков видно, что значение кинетической энергии заряженных частиц заметно уменьшается после диполизации. На этом же рисунке приведено значение кинетической энергии частиц в трубках в случае адиабатического процесса сжатия магнитных силовых трубок. Адиабатическое сжатие магнитных силовых трубок происходит за счет работы внешних сил, а именно работы электрического поля магнитосферно-ионосферной конвекции в отсутствие высыпаний. Заметное возрастание энергии с уменьшением кошироты θ связано со значительным увеличением объема магнитных силовых трубок на больших расстояниях от Земли.

Сделаем оценки скорости движения магнитных силовых линий, вмороженных в плазму в экваториальной плоскости магнитосферы на разных расстояниях от Земли. Отметим, что это движение вызвано вихревым (замкнутым) электрическим полем и наблюдается только в магнитосфере в основном в экваториальной плоскости, на уровне ионосферы движения нет. Считая время диполизации равным пяти минутам, можно оценить скорость плазмы на разных расстояниях от Земли. На рисунке 5 можно видеть, что магнитная силовая линия, находящаяся на расстоянии в 9,1RE до диполизации, смещается на расстояние 7,8RE, и мы получаем среднюю скорость ≈ 27 км/с. На расстоянии 10,5RE магнитная силовая линия смещается за время диполизации на расстояние 8,4RE, средняя скорость ≈ 44 км/с. На расстоянии положения Themis (*e*) в 11RE средняя скорость ≈ 45 км/с, что заметно меньше альвеновской скорости. На больших расстояниях, например 19,6RE, этот участок не приведен на рисунке 5, магнитная силовая линия смещается за время диполизации на расстояние 9,4RE, и средняя скорость ≈ 220 км/с. Уменьшение скорости плазмы по направлению к Земле во время диполизации является хорошо установленным экспериментальным фактом, полученные значения скоростей также соответствуют наблюдениям [5].

Сделаем оценки охлаждения магнитных силовых трубок за счет высыпания энергичных электронов. Ток в дугах полярных сияний может достигать значения $j = 10$ А/км², среднюю энергию высыпающихся частиц примем $E_{cp} = 5$ кэВ, совпадающую с оценочным значением продольной разности потенциалов. Время процесса $t = 5$ минут. Количество тепла Q , теряемого магнитной трубкой с единичным магнитным потоком определяется следующим выражением:



$$Q = jE_{cp} t / eB_u, \quad (6)$$

где $B_{и}$ — индукция магнитного поля в ионосфере, принимая $B_{и} = 0,58 \cdot 10^{-4}$ Тл (что соответствует магнитной кошироте $\theta = 23^{\circ}$), получим $Q = 0,26$ МДж/Вб. Оценка выделения энергии в дуге по результатам наблюдений на спутниках DMSP и Cluster [5] дает значение в два раза меньше, но и энергия высыпающихся электронов в этом случае тоже почти в два раза меньше и составляет 3 кэВ.

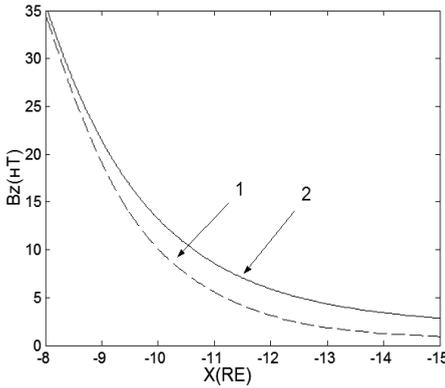


Рис. 3. Изменение V_z компоненты вдоль оси X (Земля-Солнце) до (1) и после (2) диполизации

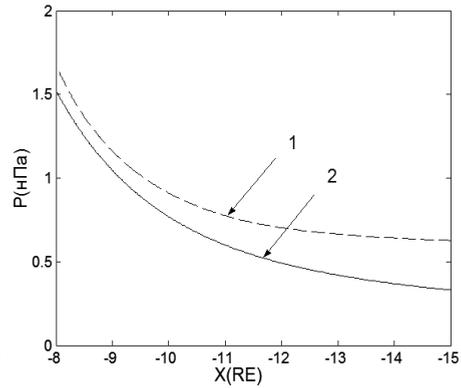


Рис. 4. Изменение давления плазмы p вдоль оси X до (1) и после (2) диполизации

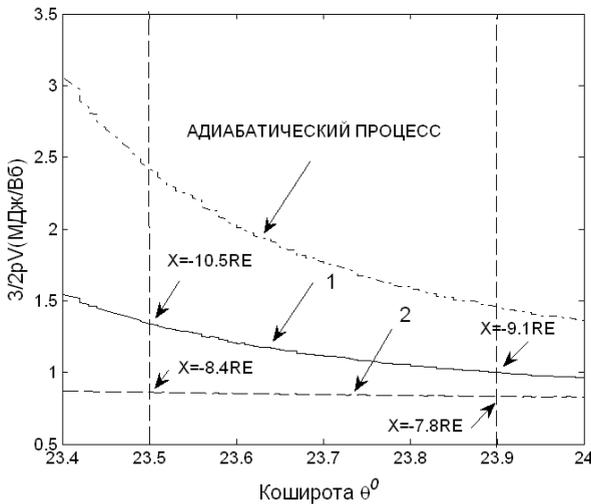


Рис. 5. Зависимость внутренней (газокинетической) энергии магнитных силовых трубок, имеющих единичный магнитный поток, от коширота θ до (1) и после диполизации с учетом высыпания частиц (2) и без учета высыпания частиц для адиабатического процесса

К этим потерям следует добавить поток электромагнитной энергии в ионосферу, его можно оценить по Джоулевым потерям в дуге сияния



Q_c . Принимая электрическое поле поперек дуги $E = 20$ мВ/м, интегральную Педерсеновскую проводимость ионосферы в дуге $\Sigma_P = 40$ См [8], получим потери $Q_c = \Sigma_P E^2 t / V_i = 0,083$ МДж/Вб. Суммарные потери равны 0,34 МДж/Вб. Этому значения достаточно, чтобы объяснить охлаждение магнитных силовых трубок на расстояниях до 10 RE (рис. 5). На больших расстояниях объемы магнитных силовых трубок и их внутренняя кинетическая энергия изменяются более значительно. Значительное расхождение кривых 1 и 2 (рис. 5) на больших расстояниях от Земли говорит о том, что на этих расстояниях следует учитывать не только радиальное к Земле движение плазмы, но и долготное.

Таким образом, высыпания заряженных частиц оказывают влияние на перераспределение давления плазмы и B_z компоненты магнитного поля в хвосте магнитосферы. Это влияние проявляется как эффект диполизации магнитных силовых линий. Эффект высыпаний, согласно полученным результатам, существенен на расстояниях, не превышающих 10 RE. На больших расстояниях в рамках данной модели охлаждение магнитных трубок трудно объяснить только высыпанием частиц. Во время диполизации скорости движения плазмы по сделанным оценкам уменьшаются по направлению к Земле от 220 км/с на расстоянии 20 RE до 25 км/с на расстоянии 8RE, что согласуется с наблюдениями.

Список литературы

1. *Runov A., Angelopoulos V., Sitnov M.I. et al.* THEMIS observations of an earthward-propagating dipolarization front // *Geophysical Research Letters*. 2009. Vol. 36.
2. *Birn J., Raeder J., Wang Y.L. et al.* On the propagation of bubbles in the geomagnetic tail // *Ann. Geophys.* 2004. №22. P. 1773–1786.
3. *Volkov M.A., Namgaladze A.A.* Models of field-aligned currents needful to simulate the substorm variations of the electric field and other parameters observed by EISCAT // *Annales Geophysicae*. 1996. Vol. 14, №12. P. 1356–1361.
4. *Knight S.* Parallel electric fields // *Planet. Space Sci.* 1973. №21.
5. *Vaivads A. et al.* What high altitude observations tell us about the auroral acceleration: A Cluster/DMSF conjunction // *Geophysical Research Letters*. 2002. Vol. 30. Iss. 3. P. 6–1.
6. *Tsyganenko N. A.* Modeling the Earth's Magnetospheric Magnetic Field Confined Within a Realistic Magnetopause // *J. Geophys. Res.* 1995. №100. P. 5599–5612.
7. *Liou K., Meng C.-I., Lui A. T. Y. et al.* Magnetic dipolarization with substorm expansion onset // *J. Geophys. Res.* 2002. 107(A7).
8. *Marklund G., Sandahl I., Opgenoorth H.* A study of the dynamics of a discrete auroral arc // *Planet. Space. Sci.* 1982. Vol. 30. P. 179.

Об авторах

Михаил Анатольевич Волков — канд. физ.-мат. наук, доц. Мурманский государственный технический университет.
E-mail: volkovma@mstu.edu.ru

About the authors

Mikhail Volkov — PhD, Ass. Prof., Murmansk State Technical University.
E-mail: volkovma@mstu.edu.ru