

# ФИЗИКА СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ

DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.5.9-15  
УДК 560.386

А. Г. Яхнин, Т. А. Яхнина, С. А. Черняева

## ВЗАИМОСВЯЗЬ КОНФИГУРАЦИИ НОЧНОЙ МАГНИТОСФЕРЫ С ПАРАМЕТРАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

### Аннотация

Широта границы изотропных потоков энергичных протонов, определяемая по данным низкоорбитальных спутников, является индикатором того, насколько сильно вытянуты в хвост магнитные силовые линии в околоземной ночной магнитосфере. На основе анализа взаимосвязи широты изотропной границы с параметрами солнечного ветра и индексами геомагнитной активности показано, что среди параметров, характеризующих взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой, максимальное влияние на конфигурацию ночной магнитосферы оказывает электрическое поле пересоединения. В то же время, конфигурация ночной магнитосферы влияет на геомагнитную активность сильнее, чем параметры солнечного ветра.

### Ключевые слова:

*изотропная граница, солнечный ветер, индексы геомагнитной активности.*

A. G. Yahnin, T. A. Yahnina, S. A. Chernyaeva

## RELATIONSHIP BETWEEN THE NIGHTSIDE MAGNETOSPHERE CONFIGURATION AND PARAMETERS OF THE SOLAR WIND AND GEOMAGNETIC ACTIVITY

### Abstract

The latitude of the isotropy boundary of energetic protons, which is determined from the data of low-orbiting satellites, depends on stretching of the nightside near-Earth magnetotail. On the basis of consideration of the relationship between the isotropic boundary and parameters of the solar wind and geomagnetic activity, it is shown that among the parameters characterizing the solar wind – magnetosphere interaction, the merging electric field has the strongest influence on the magnetotail configuration. At the same time, the magnetotail configuration affects the geomagnetic activity more strongly than the solar wind parameters.

### Keywords:

*isotropic boundary, solar wind, indices of geomagnetic activity.*

### Введение

Наклон магнитного поля на геостационарной орбите относительно экваториальной плоскости на ночной стороне характеризует вытянутость магнитных силовых линий в хвост магнитосферы и, соответственно, характеризует интенсивность тока поперек магнитосферы и близость его к Земле. В работе [1] было показано, что уменьшение широты границы изотропных потоков энергичных ( $>30$  кэВ) протонов, определенной по данным

низкоорбитальных спутников NOAA POES, соответствует уменьшению вертикальной компоненты магнитного поля на геостационарной орбите и росту горизонтальной компоненты. Это означает, что наклон силовых линий коррелирует с широтой изотропной границы (ИГ) протонов. В работе [2] предложен индекс конфигурации силовых линий околоземной части хвоста магнитосферы (Magnetotail или MT-index):

$$MT = IB - A_1 * [1 - \cos(\pi/12 (MLT - MLT_0))] \quad (1)$$

где IB и MLT – это широта и магнитное местное время наблюдения ИГ на спутнике;  $A_1=4.3^\circ$  – это амплитуда суточной вариации широты ИГ; и  $MLT_0=23.4$ . Параметры  $A_0$  и  $MLT_0$ , были определены на основе ~2000 измерений широты ИГ по данным спутников NOAA POES. Таким образом, MT-индекс – это «приведенное» к предполуденному сектору положение изотропной границы для условий, в которых проходило определение реальной ИГ в каком-либо секторе MLT.

Авторы работ [3, 4] показали, что хорошим приближением для ИГ является широта максимума потока высыпающихся протонов с энергиями 3-30 кэВ. В номенклатуре границ высыпаний заряженных частиц по данным спутников DMSP, введенной в работе [5] эта граница получила название b2i. Использование b2i вместо ИГ энергичных протонов имеет определенные преимущества. В частности, потому, что сотрудниками лаборатории прикладной физики университета Джона Хопкинса разработан алгоритм для автоматического определения границ высыпаний по данным DMSP и создана база данных таких границ, включающая, среди прочих, и b2i, за период с 1984 по 2015 г., который охватывает три цикла солнечной активности. Эта база позволяет, в частности, проводить статистические исследования, в которых параметр, характеризующий конфигурацию магнитосферы, может быть сопоставлен с параметрами солнечного ветра и индексами геомагнитной активности (например, [6, 7]). В упомянутых работах использовались данные за 1984-1999 г.г. и 1984-2004 г.г. соответственно. Так, в работе [7], в которой рассматривался интервал, включающий два максимума и два минимума солнечной активности, было показано, что среднегодовые значения b2i минимальны в годы максимумов и максимальны в годы минимумов. Кроме того, показано, что имеется сезонный ход широты b2i: минимальные значения наблюдаются весной и осенью, а максимальные летом и зимой [6, 7].

В настоящее время подобное исследование можно провести с добавлением интервала после 2004 г., включающего глубокий минимум 2009 г. и существенную часть 24 цикла солнечной активности. Это и будет сделано в нашей работе.

### Данные

К сожалению, база данных границ высыпаний по данным спутников DMSP перестала пополняться после 2015 года. Более того, мы обнаружили резкое изменение в характере взаимосвязи b2i с другими параметрами, характеризующими солнечный ветер и геомагнитную активность в 2014 и 2015 годах. До выяснения природы такого несоответствия (возможно, это связано с

качеством данных) мы исключили эти годы из рассмотрения. Таким образом, использовались данные за интервал с 1984 г. по 2013 г.

Как было отмечено в работе [7], средний за год МТ-индекс практически не отличается от среднегодового значения  $b_{2i}$  в предполуночном секторе. Поэтому вместо расчета МТ-индекса для всех 691403 измерений  $b_{2i}$  мы использовали измерения только в секторе  $MLT = 22-24$ , т.е. в окрестности  $MLT_0$  в формуле (1). Количество измерений  $b_{2i}$  в окрестности  $MLT_0$  менялось от года к году в пределах от 440 до 4461 (всего 65860 значений).

Каждому значению  $b_{2i}$  в секторе  $MLT = 22-24$  были сопоставлены значения среднечасовых параметров солнечного ветра и геомагнитной активности из базы данных OMNI (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>). Если измерение  $b_{2i}$  приходилось на первую половину часа, то брались значения из OMNI за предыдущий час, если измерение  $b_{2i}$  приходилось на вторую половину часа – брались значения параметров из OMNI за текущий час. Исключения составили число солнечных пятен ( $W$ ), для которого брались суточные значения, и трехчасовой индекс геомагнитной активности  $K_p$ . Среднечасовые значения скорости солнечного ветра и компонент магнитного поля были использованы для определения величин некоторых параметров солнечного ветра, в частности, электрического поля пересоединения  $E_{KL} = V * V_T * \sin^2(\theta/2)$ , где  $V$  – скорость солнечного ветра,  $V_T = (B_z^2 + B_y^2)^{1/2}$ ,  $B_z$  и  $B_y$  – компоненты межпланетного магнитного поля,  $\theta = \tan^{-1}(B_y/B_z)$  [8].

### Связь $b_{2i}$ с параметрами солнечного ветра и геомагнитной активностью

Таблица 1 показывает коэффициенты корреляции линейной парной регрессии для «мгновенных» значений  $b_{2i}$  и соответствующих параметров межпланетной среды и геомагнитной активности. В качестве параметров, характеризующих внешние условия (солнечную активность и солнечный ветер), рассматривались электрическое поле пересоединения,  $E_{KL}$ ; магнитное поле  $B_s$  равно  $B_z$ , когда  $B_z < 0$ , и равно 0, когда  $B_z > 0$ , динамическое давление  $P$ ; скорость солнечного ветра  $V$ ; температура  $T$ , концентрация  $N$ ; число Маха-Альфвена  $Ma_n$ ; а также число солнечных пятен ( $W$ ). Геомагнитная активность характеризовалась индексами  $K_p$ ,  $AE$  и  $Dst$ . Из таблицы следует, что, во-первых, среди параметров солнечного ветра наибольший коэффициент корреляции с  $b_{2i}$  имеет электрическое поле пересоединения  $E_{KL}$  и, во-вторых,  $b_{2i}$  коррелирует с геомагнитной активностью лучше, чем параметры солнечного ветра.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции между параметрами солнечного ветра,  $b_{2i}$ , и индексами геомагнитной активности.

	$b_{2i}$	$E_{KL}$	$B_s$	$P$	$V$	$T$	$N$	$Ma_n$	$W$
<b><math>K_p</math></b>	-0.768	0.575	-0.544	0.468	0.542	0.480	0.114	-0.237	0.158
<b><math>AE</math></b>	-0.698	0.667	-0.564	0.315	0.410	0.354	0.045	-0.200	0.110
<b><math>Dst</math></b>	0.637	-0.514	0.502	-0.105	-0.444	-0.268	-0.198	0.259	-0.182
<b><math>b_{2i}</math></b>		-0.599	0.587	-0.451	-0.370	-0.362	-0.179	0.239	-0.228

На рис. 1 (слева) приведены вариации *среднегодовых значений* широты  $b_{2i}$  в предполуденном секторе в ходе 22, 23 и 24 циклов солнечной активности совместно со *среднегодовыми значениями* «внешних» параметров, приведенных в Таблице 1. Правая часть рис. 1 представляет взаимосвязь  $b_{2i}$  и каждого из этих параметров. Приведены коэффициенты детерминации в предположении линейной парной регрессии. Видно, что максимальный коэффициент детерминации (и соответственно, коэффициент корреляции) имеет место для пары  $b_{2i}$  и  $E_{KL}$ .

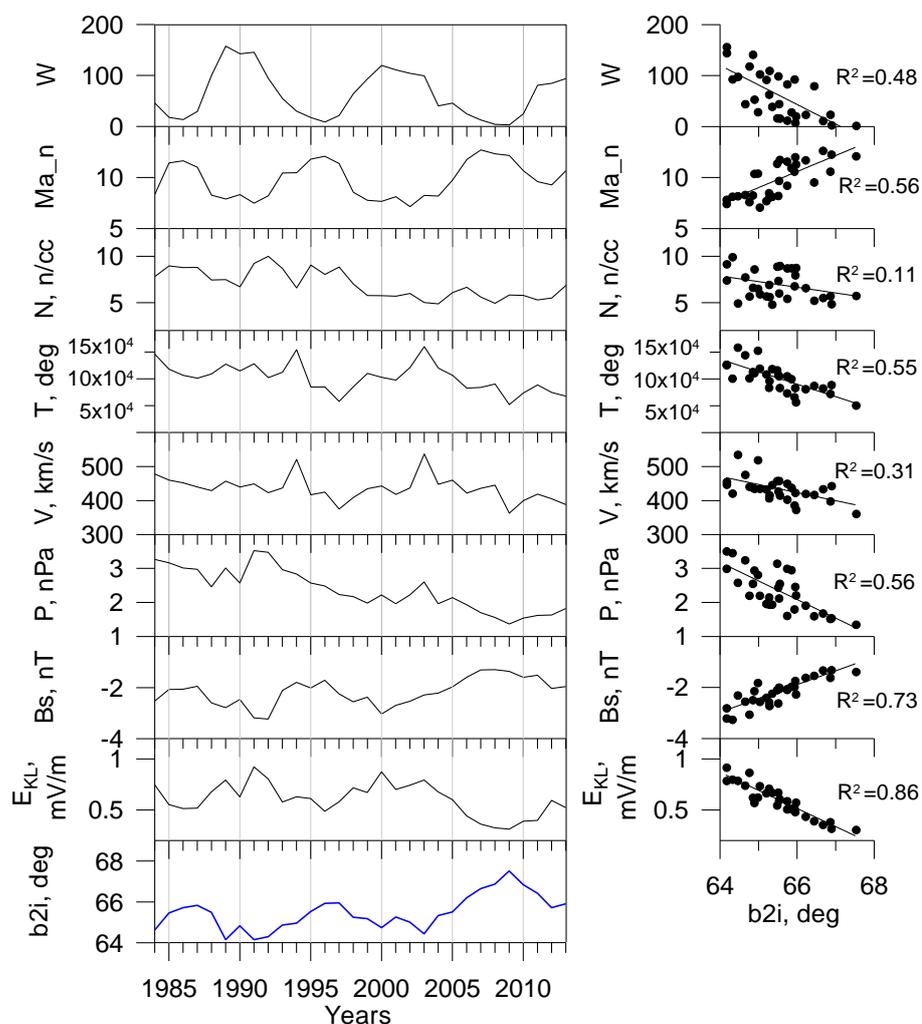


Рис. 1. Вариации среднегодовых значений параметров, характеризующих солнечную активность и солнечный ветер, совместно с вариациями индекса магнитосферной конфигурации (слева). Взаимосвязь индекса конфигурации и параметров, характеризующих внешние условия. Приведен коэффициент детерминации  $R^2$  (справа).

На рис. 2 показано, как среднегодовые значения  $b_{2i}$  связаны с индексами геомагнитной активности  $K_p$ ,  $Dst$  и  $AE$ . Для всех индексов связь с  $b_{2i}$  очень сильная (абсолютная величина коэффициента корреляции  $>0.9$ ).

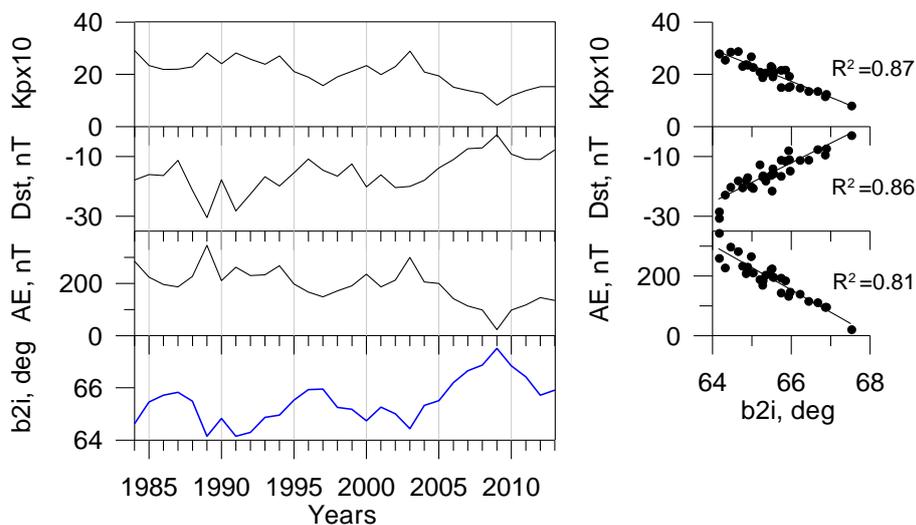


Рис. 2. Вариации среднегодовых значений индексов геомагнитной активности совместно с вариациями индекса магнитосферной конфигурации (слева). Взаимосвязь индекса конфигурации и индексов геомагнитной активности. Приведен коэффициент детерминации  $R^2$  (справа).

### Обсуждение

В этой работе на основе 30-летнего массива данных о широте границы высыпаний  $b_{2i}$  подтвержден вывод работы [7] о том, что конфигурация магнитного поля на ночной стороне становится «более дипольной» вблизи минимумов солнечной активности и более «вытянутой» — вблизи максимумов. В рассматриваемый период конфигурация магнитосферы была наиболее близкой к дипольной в 2009 г. (начало 24 цикла). В работе [4] широта  $b_{2i}$  была статистически сопоставлена с величиной вертикальной компоненты магнитного поля и с наклоном силовой линии на геостационарной орбите. Среднегодовое значение  $b_{2i}$  в 2009 г. соответствует среднему наклону силовой линии на геостационарной орбите равному  $45-50^\circ$  и вертикальной компоненте магнитного поля равной  $55-60$  нТл. Наиболее «вытянутой» конфигурация магнитосферы была в максимуме 22 цикла. В этот период, согласно работе [4], среднегодовое значение  $b_{2i}$  соответствовало среднему наклону силовой линии равному  $30^\circ$ , а средняя вертикальная компонента поля составляла  $40$  нТл.

Как уже отмечалось, широта  $b_{2i}$  (широта изотропной границы) является одной из характеристик состояния магнитосферы, точнее, токового слоя поперек магнитосферного хвоста. Токовый слой хвоста играет важную роль в развитии магнитосферных возмущений, а значит, и в геомагнитной активности; с токовым слоем связывают, например, неустойчивости, приводящие к магнитосферным суббурям. Более вытянутые в хвост силовые линии соответствуют большей интенсивности тока поперек хвоста магнитосферы, а это означает большую

вероятность развития плазменных неустойчивостей, приводящих к суббурям (например, процесса пересоединения магнитных силовых линий). Это согласуется с результатами работы [9], в которой показано, что во время максимума солнечной активности процесс пересоединения развивается в плазменном слое на более близких к Земле расстояниях, чем во время минимума солнечной активности. В то же время, в работе [10] показано, что пересоединение, развивающееся ближе к Земле, приводит к более интенсивной суббуре. Это согласуется с хорошей корреляцией между  $b_2i$  и индексами геомагнитной активности.

Описанные выше соотношения между различными параметрами, характеризующими солнечный ветер (в частности,  $E_{KL}$ ), конфигурацию околоземной магнитосферы ( $b_2i$ ) и геомагнитную возмущенность на земной поверхности (индексы геомагнитной активности) ясно показывают, что конфигурация ночной магнитосферы является важным параметром, определяющим развитие геомагнитной активности. Действительно, коэффициенты корреляции между индексами геомагнитной активности и  $b_2i$  выше, чем такие коэффициенты для индексов геомагнитной активности и параметров солнечного ветра, включая такой геоэффективный параметр как электрическое поле пересоединения  $E_{KL}$ . В свою очередь, электрическое поле  $E_{KL}$  является основным параметром, определяющим конфигурацию хвоста магнитосферы. Это представляется естественным, поскольку  $E_{KL}$  определяет скорость переноса силовых линий магнитного поля солнечного ветра в магнитосферу, от которой зависит магнитный поток в долях хвоста, и, соответственно, интенсивность тока поперек хвоста.

### **Выводы**

Конфигурация ночной околоземной магнитосферы испытывает долговременные вариации в ходе цикла солнечной активности. Силовые линии магнитного поля более «дипольные» в годы минимумов солнечной активности и более вытянуты в хвост магнитосферы в годы максимумов.

Среди различных параметров межпланетной среды, главным фактором, влияющим на «вытянутость» магнитосферы, является электрическое поле пересоединения  $E_{KL}$ . В то же время «вытянутость» магнитосферы лучше коррелирует с геомагнитной активностью, чем все параметры межпланетной среды, включая  $E_{KL}$ .

**Благодарности.** Авторы благодарят Патрика Ньюэла и Томаса Сотирелиса из лаборатории прикладной физики университета Джона Хопкинса (США) за возможность использования базы данных границ высыпаний заряженных частиц по данным спутников DMSP. Детекторы частиц на спутниках DMSP были разработаны Дейвом Харди из исследовательской лаборатории BBC США.

### **Литература**

1. Sergeev, V. A., M. V. Malkov, and K. Mursula. Testing of the isotropic boundary algorithm method to evaluate the magnetic field configuration in the tail // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. P. 7609-7620.
2. Sergeev V.A., B.B. Gvozdevsky. MT-index - a possible new index to characterize

the magnetic configuration of magnetotail // *Ann. Geophys.* 1995. V. 13. P. 1093-1103.

3. Гвоздевский Б.Б., Сергеев В.А. Рассеяние на токовом слое возможный механизм высыпания авроральных протонов // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1995. Т. 35. № 4. С. 151-155.
4. Newell P.T., V. A. Sergeev, G. R. Bikkuzina, S. Wing. Characterizing the state of the magnetosphere: testing the ion precipitation maxima latitude (b2i) and the ion isotropy boundary // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 4739-4745.
5. Newell P.T., Y.I. Feldstein, Yu. I. Galperin, C.-I. Meng. The morphology of nightside precipitation // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 10737-10748.
6. Newell, P. T., T. Sotirelis, J. P. Skura, C.-I. Meng, and W. Lyatsky. Ultraviolet insolation drives seasonal and diurnal space weather variations // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107(A10). 1305.
7. Yahnina T.A., A.G. Yahnin, D.A. Yahnin, P.T. Newell, and T. Sotirelis. Long-term behaviour of the magnetotail stretching // *Proceedings of 28<sup>th</sup> Seminar "Physics of auroral phenomena"*. 2005. P. 78-81.
8. Kan, J. R., and L. C. Lee. Energy coupling functions and solar wind magnetosphere dynamo // *Geophys. Res. Lett.* 1979. V. 6. P. 577.
9. Nagai, T., M. Fujimoto, R. Nakamura, W. Baumjohann, A. Ieda, I. Shinohara, S. Machida, Y. Saito, and T. Mukai. Solar wind control of the radial distance of the magnetic reconnection site in the magnetotail // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. A09208.
10. Miyashita, Y., Y. Kamide, S. Machida, L. Liou, T. Mukai, Y. Saito, A. Ieda, C.-I. Meng, G. K. Parks. Difference in magnetotail variations between intense and weak substorms // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. A11205.

#### **Сведения об авторах**

##### **Яхнин Александр Григорьевич,**

к.ф.-м.н., зав. лаб., Полярный геофизический институт, Апатиты  
E-mail: ayahnin@gmail.com

##### **Яхнина Татьяна Андреевна,**

к.ф.-м.н., с.н.с. Полярный геофизический институт, Апатиты;  
E-mail: tyahnina@gmail.com

##### **Черняева Софья Александровна,**

ведущий инженер, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург  
E-mail: sonya.a.chernyaeva@gmail.com