

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.009

## СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ИНДИКАТОРОВ МАГНИТОСФЕРНОГО КОЛЬЦЕВОГО ТОКА

Г.А. Макаров

ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения  
Российской академии наук», Институт космических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера  
СО РАН, г. Якутск, 677980, Россия; e-mail: gmakarov@ikfia.ysn.ru

**Аннотация.** Исследуются вариации среднесуточных значений геомагнитных индексов Dst, SYM-H и ASY-H. Установлено, что SYM-H и ASY-H линейно растут по модулю с ростом модуля Dst и в течение года имеют возрастания в периоды равноденствий. Модуль отношения (SYM-H)/(ASY-H) растет с ростом модуля Dst и приближается к 1, что означает сравнимость симметричного и асимметричного компонент кольцевого тока.

### 1. Введение

Индексы Dst, SYM и ASY являются геомагнитными характеристиками магнитосферного кольцевого тока, Dst отражает интенсивность кольцевого тока [Sugiura and Kamei, 1991], SYM и ASY дают информацию о симметричной и асимметричной компонентах кольцевого тока [Iyemori et al., 2010].

Исследования сезонных изменений индекса Dst не потеряли актуальности по сей день. Их рассмотрение было продолжено в работах [Mayaud, 1978], [Cliver et al., 2001], [Takalo and Mursula, 2001], [Hakkinen et al., 2003], [Temerin and Li., 2006], [Макаров, 2020] и др. Обычно объяснения причин сезонных вариаций основаны на изменении ориентации геомагнитного диполя относительно топологии гелиосферы.

Изучая вариации индексов SYM, ASY и Dst, авторы работ [Iyemori et al., 2010] и [Weygand and McPherron, 2006] выявили, что в них содержатся смещения, отражающие тот факт, что эти индексы отличны от нулевых значений в спокойное время. Было выяснено, что смещения представляют собой суммарный вклад нескольких токовых систем, присутствующих в магнитосфере в спокойные от магнитных бурь периоды.

Авторы работы [Kalegaev and Makarenkov, 2008] определили относительные вклады кольцевого тока и магнитосферного хвостового тока в Dst и установили, что кольцевой ток становится доминирующим источником Dst во время сильных магнитных бурь, но во время умеренных бурь его вклад в Dst сопоставим со вкладом хвостового тока. В работе [Dubyagin et al., 2014] с использованием эмпирических моделей магнитосферы был изучен относительный вклад различных токовых систем в индексы SYM и ASY: симметричного кольцевого тока; тока поперек магнитосферного хвоста; ионосферных токов замыкания системы частичного кольцевого тока и продольных токов зон 1 и 2; чисто ионосферных токовых систем.

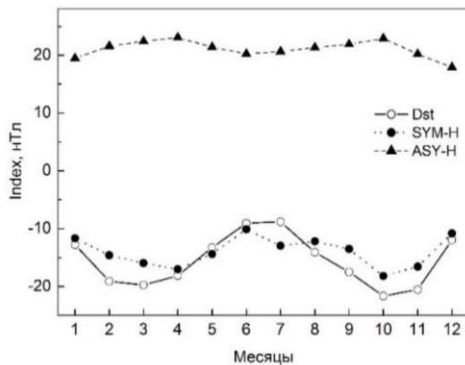
Кольцевой ток является важным образованием в магнитосфере Земли и играет ключевую роль в развитии геомагнитных бурь. Исследования солнечно-земных связей и проявлений космической погоды часто осуществляется посредством статистических работ, в частности, с использованием среднесуточных значений земных, межпланетных и солнечных параметров. При суточном осреднении земных параметров разные фазы геомагнитных бурь могут накладываться, информация о бурях (фазы, интенсивность, длительность и др.) будет в значительной мере нивелироваться. В этой связи, представляется интересным исследовать изменения среднесуточных значений геомагнитных индексов SYM-H и ASY-H. Целью работы является рассмотрение сезонных вариаций индексов SYM-H, ASY-H по их среднесуточным данным.

### 2. Вариации индексов Dst, SYM-H и ASY-H

В работе используются геомагнитные индексы Dst, SYM-H и ASY-H за период 1981-2016 гг. Данные об индексах, полученные из Мирового центра по геомагнетизму в Японии (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>), усреднены посуточно по временной шкале UT. Всего этот период содержит 13149 дней, в том числе дней, когда Dst>0 нТл, было 2307, Dst=0 нТл – 321 и Dst<0 нТл – 10521.

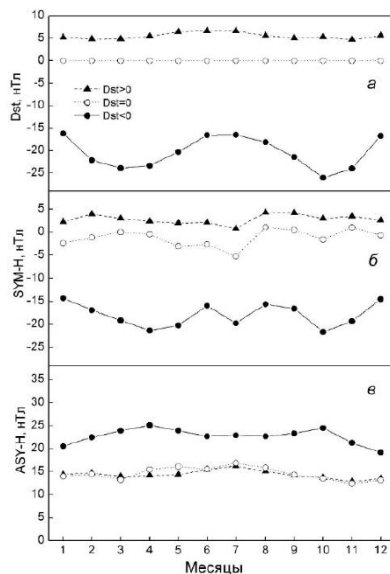
На рис. 1 показаны сезонные изменения среднесуточных значений индексов Dst, SYM-H и ASY-H, осредненные за весь период настоящего анализа. Видно, что все 3 индекса претерпевают изменения с заметными полугодовыми возрастаниями абсолютных значений в периоды равноденствий, при этом средние за год значения индексов Dst, SYM-H и ASY-H равны –15.5 нТл, –14.0 нТл и 21.1 нТл соответственно. Поведение индексов Dst и SYM-H подобно, что ранее было отмечено в [Iyemori, 2010; Weygand and McPherron, 2006]. Гармонический анализ сезонных изменений дал следующие результаты: для индекса Dst амплитуда первой гармоники R1=2.82 нТл, фаза φ1 минимальных значений приходится на ~ 6

марта, амплитуда второй гармоники  $R_2=4.98$  нТл, фаза  $\varphi_2$  минимальных значений приходится на ~ 17 марта и 17 сентября; для индекса SYM-H  $R_1=0.62$  нТл,  $\varphi_1 \sim 28$  марта,  $R_2=2.89$  нТл,  $\varphi_2 \sim 23$  марта, 23 сентября; для индекса ASY-H  $R_1=0.74$  нТл,  $\varphi_1$  максимальных значений приходится на ~ 18 мая,  $R_2=1.75$  нТл,  $\varphi_2$  максимальных значений приходится на ~ 11 марта, 11 сентября. У всех трех индексов первые гармоники вариаций имеют незначительные амплитуды, а вторые гармоники отличаются достаточно заметными амплитудами – у Dst  $R_2$  почти в 2 раза больше, чем  $R_1$ , у SYM-H это соотношение почти в 5 раз, у ASY-H в 2.5 раза. Фазы  $\varphi_2$  всех индексов практически совпадают и наблюдаются в периоды равноденствий. Отношения амплитуд вторых гармоник сезонных вариаций индексов к их среднегодовым значениям равны: у Dst  $-0.3$ , у SYM-H  $-0.2$  и у ASY-H  $0.1$ . Это говорит о том, что полугодовые вариации индексов существенны, особенно Dst и SYM-H. Отсюда можно предположить, что симметричная компонента магнитосферного кольцевого тока довольно заметно подвержена сезонным изменениям, в отличие от асимметричной компоненты.



**Рисунок 1.** Сезонные изменения индексов Dst, SYM-H и ASY-H за весь рассматриваемый период, Index – один из этих индексов.

кольцевого тока и других токов, так и из медленно меняющейся не буревой составляющей. Сделано заключение, что классический равноденственный эффект, по-видимому, доминирует в буревой компоненте, составляя 20-40% амплитуды 6-месячной волны в Dst против ~ 10% для комбинированного механизма, включающего аксиальный эффект и эффект Рассела-МакФеррона [Russell and McPherron, 1973]. Предполагается, что не буревая составляющая 6-месячной волны в Dst обусловлена эффектом, описанным в [Malin and Isikara 1976] и связанным с полугодовым изменением средней широты кольцевого тока.



**Рисунок 2.** Сезонные изменения индексов Dst (а), SYM-H (б) и ASY-H (в) при разных значениях Dst.

Первые гармоники всех 3-х индексов имеют небольшие амплитуды и, по-видимому, обусловлены неоднородностью сети станций [Mayaud, 1978; Данилов и Макаров, 1992; Hakkinen et al., 2003]. Действительно, более однородная сеть станций индексов SYM-H и ASY-H практически исключает образование годовых волн у этих индексов.

Образование вторых гармоник у индексов, вероятно, связано с углом между направлением солнечного ветра и геомагнитной экваториальной плоскостью. Когда угол принимает  $90^\circ$ , то в магнитосфере создаются благоприятные условия для инжекции заряженных частиц из плазменного слоя в область кольцевого тока. В работе [Cliver et al., 2001] получено, что сезонная модуляция Dst состоит как из буревой составляющей, возникающей в результате быстрых изменений

в работе [Данилов и Макаров, 2006] возникновение полугодовых вариаций Dst объясняется перемещением плазменного слоя относительно плоскости геомагнитного экватора при годовом обращении Земли вокруг Солнца и последующим изменением интенсивности частичного кольцевого тока. Наибольшая вероятность поступления частиц в магнитосферу имеет место в периоды равноденствий, наименьшая – в периоды солнцестояний. Подобное объяснение предложено в работе [Mayaud, 1978], в которой происхождение полугодовой вариации Dst связывается с эффектом Малина – Исикары: при годовом обращении Земли вокруг Солнца кольцевой и хвостовой токи смещаются на север зимой (Северное полушарие) и на юг летом в результате сжатия магнитосферы солнечным ветром. Эффект Малина – Исикары был применен также для объяснения годовой и суточной Dst-вариаций [Mayaud, 1978; Cliver et al., 2001; Takalo and Mursula, 2001]. Различие схем, предложенных в работах [Данилов и Макаров, 2006] и [Malin and Isikara, 1976], состоит в том, что мы учитываем смещение относительно геомагнитного экватора плазменного

слоя как источника частиц кольцевого тока, тогда как во второй работе рассматривается изменение в течение года средней широты кольцевого тока. Предположения об изменении расположения частичного кольцевого тока относительно плоскости геомагнитного экватора [Данилов и Макаров, 2006; Malin and Isikara, 1976], на наш взгляд, подтверждаются результатами работы [Liu et al., 2019], в которой по данным коллаборации SuperMAG было получено положение кольцевого тока по магнитной широте при развитии интенсивных геомагнитных бурь.

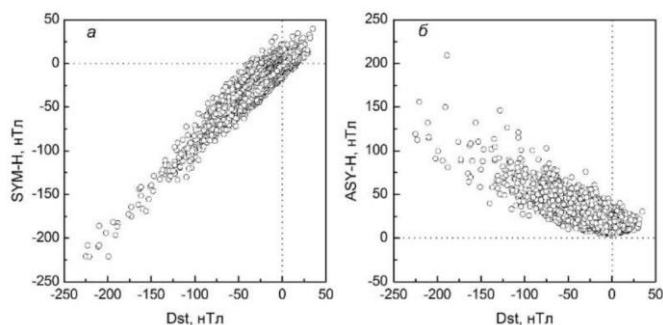
### 3. Зависимость индексов от уровня магнитной возмущенности

Рассмотрим влияние уровня возмущенности на индексы. На рис. 2 приведены сезонные ходы индексов Dst, SYM-H и ASY-H для разных значений индекса Dst: Dst>0 нТл, Dst=0 нТл и Dst<0 нТл.

На рис. 2 можно заметить, что во всех случаях 3 индекса изменяются в течение года, но наиболее выражено при Dst<0 нТл. При Dst<0 нТл изменения индексов подобны их сезонным вариациям, представленным на рис. 1, и также имеют равноденственные максимумы. Абсолютные значения индексов при спокойных условиях, когда Dst>0 нТл и Dst=0 нТл, не сильно изменяются в течение года, но возрастают по мере изменения знака Dst с положительного на отрицательный. Индексы Dst и SYM-H проявляют подобные между собой изменения, однако при Dst=0 нТл видны отклонения SYM-H величиной до  $\pm 3$  нТл относительно среднегодового значения  $-1.23$  нТл. Отметим практически одинаковое поведение индекса ASY-H при Dst>0 нТл и Dst=0 нТл, причем ASY-H в этих условиях примерно равен  $14.6$  нТл. Этот факт можно рассматривать как постоянное наличие асимметричного кольцевого тока в магнитосфере, даже в спокойных условиях [Iyemori et al., 2010; Weygand and McPherron, 2006], в том числе при Dst>0 нТл, или как влияние ионосферных токов [Dubyagin et al., 2014].

На рис. 3 приведены корреляционные графики между Dst и SYM-H (а) и Dst и ASY-H (б), составленные по среднесуточным значениям индексов по всему массиву данных. Видно, что связи очень тесные, SYM-H по модулю и ASY-H растут с ростом модуля Dst, что можно интерпретировать как одновременное увеличение симметричного и асимметричного компонентов кольцевого тока по мере усиления магнитной возмущенности. Заметно, что симметричный компонент нарастает сильнее, чем асимметричный компонент.

Соотношения между индексами можно выразить уравнениями SYM-H =  $0.86 \cdot \text{Dst} - 0.60$  с величиной достоверности линейной аппроксимации  $0.88$  и ASY-H =  $-0.43 \cdot \text{Dst} + 14.40$  с величиной достоверности линейной аппроксимации  $0.61$ . Отметим, что уравнения содержат свободные члены (или смещения): в паре индексов SYM-H и Dst смещение равно  $-0.60$  нТл, а в паре ASY-H и Dst  $14.40$  нТл. Существенное смещение у индекса ASY-H также может быть указанием на постоянное наличие частичного кольцевого тока в магнитосфере, даже в спокойных условиях [Iyemori et al., 2010] и [Weygand and McPherron, 2006].

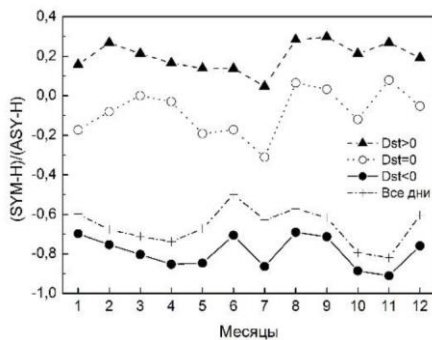


**Рисунок 3.** Сравнение среднесуточных значений индексов Dst и SYM-H (а), Dst и ASY-H (б). Пунктирные прямые нанесены относительно нулевых значений индексов.

### 4. О показателе симметрии кольцевого тока

Показателем степени симметрии кольцевого тока по определению [Weygand and McPherron, 2006] является отношение (SYM-H)/(ASY-H). На рис. 4 показаны сезонные изменения отношения (SYM-H)/(ASY-H) при разных значениях индекса Dst. Видны следующие особенности: во-первых, отношение (SYM-H)/(ASY-H) растет по абсолютной величине последовательно от случаев Dst>0 нТл и Dst=0 нТл к случаю Dst<0 нТл; во-вторых, при Dst<0 нТл отношение приближается к 1; в-третьих, вариации отношения имеют выраженные возрастания в равноденственные периоды. Следует заметить, что при нашем рассмотрении, когда за сутки усредняются эффекты всех фаз бури, а также эффекты спокойных периодов, показатель симметрии кольцевого тока, возможно, теряет физический смысл, но тем не менее качественные выводы можно получить. Первая особенность, вероятно, отражает полученное при рассмотрении вариаций индекса ASY-H на рис. 2 указание о постоянном наличии частичного кольцевого тока в магнитосфере, даже в спокойных условиях. Приближение отношения модулей индексов к 1 можно объяснить тем, что в буревые дни обе компоненты кольцевого тока усиливаются, однако в силу того, что фаза восстановления бури значительно продолжительнее, чем основная фаза бури, примерно в 3 и более раз, симметричный кольцевой ток сохраняется в течение большего времени и при суточном усреднении создает вклад в геомагнитные

изменения, сравнимый со вкладом частичного кольцевого тока во время основной фазы, когда интенсивность этого тока значительно сильнее. Третья особенность отражает наличие равноденственных максимумов в сезонном ходе магнитной активности.



**Рисунок 4.** Сезонные изменения отношения индексов (SYM-H)/(ASY-H) при разных значениях Dst.

геомагнитных индексов SYM-H и ASY-H линейно растут по модулю с ростом модуля индекса Dst, что можно рассматривать как одновременное усиление симметричного и асимметричного компонентов кольцевого тока в магнитосфере, при этом симметричный компонент нарастает сильнее, чем асимметричный.

**4.** По среднесуточным данным установлено, что показатель степени симметрии кольцевых токов, отношение геомагнитных индексов (SYM-H)/(ASY-H), растет по модулю последовательно от случаев, когда  $Dst \geq 0$ , к случаю, когда  $Dst < 0$  нТл; при  $Dst < 0$  отношение приближается к 1, что означает сравнимость вкладов в индексы симметричного и асимметричного компонент кольцевого тока.

## Литература

- Данилов А.А., Макаров Г.А. (1992), О влиянии распределения геомагнитных обсерваторий на суточные и сезонные вариации Dst-индекса, *Магнитосферные исследования*, М.: МГК РАН, № 18, 125–129.
- Данилов А.А., Макаров Г.А. (2006), Зависимость магнитной активности от расположения плазменного слоя относительно геомагнитного экватора, *Геомагнетизм и аэронавигация*, Т. 46, № 2, 168–174.
- Макаров Г.А. (2020), Геометрический фактор в сезонных вариациях среднесуточных значений геомагнитного индекса Dst, *Солнечно-земная физика*, Т. 6, № 4, 59–66, doi: 10.12737/szf-64202008
- Cliver E.W., Kamide Y., Ling A.G., Yokoyama N. (2001), Semiannual variation of the geomagnetic Dst index: Evidence for a dominant nonstorm component, *J. Geophys. Res.*, 106, No. A10, 21297–21304.
- Dubyagin S., Ganushkina N., Kubyshkina M., Liemohn M. (2014), Contribution from different current systems to SYM and ASY midlatitude indices, *J. Geophys. Res.*, 119, 7243–7263, doi:10.1002/2014JA020122
- Hakkinen L.V.T., Pulkkinen T.I., Pirjola R.J., Nevanlinna H., Tanskanen E.I., Turner N.E. (2003), Seasonal and diurnal variation of geomagnetic activity: Revised Dst versus external drivers, *J. Geophys. Res.*, 108, No. A2, 1060, doi:10.1029/2002JA009428
- Iyemori T., Takeda M., Nose M., Odagi Y., Toh H. (2010), Mid-latitude Geomagnetic Indices "ASY" and "SYM" for 2009 (Provisional). Available at <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/asy.pdf>.
- Kalegaev V.V., Makarenkov E.V. (2008), Relative importance of ring and tail currents to Dst under extremely disturbed conditions, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70, iss. 2-4, 519–525.
- Liu B.J., Zhang X.X., He Fei (2019), Tilt of the ring current during the main phases of intense geomagnetic storms, *Science China. Technological Sciences*, 62, No.5, 820–828, <https://doi.org/10.1007/s11431-018-9344-5>
- Malin S.R.C., Isikara A.M. (1976), Annual variation of the geomagnetic field, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 47, 445–457, doi: 10.1111/j.1365-246X.1976.tb07096.x
- Mayaud P.N. (1978), The annual and daily variations of the Dst index, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 55, 193–201.
- Russell C.T., McPherron R.L. (1973), Semiannual variation of geomagnetic activity, *J. Geophys. Res.*, 78, No 1, 92–108, doi: 10.1029/JA078i001p00092
- Sugiura M., Kamei T. (1991), Equatorial Dst index 1957–1986, *IAGA Bull.* No. 40. 14 p.
- Takalo J., Mursula K. (2001), A model for the diurnal universal time variation of the Dst index, *J. Geophys. Res.*, 106, No. A6, 10905–1092.
- Temerin M., Li X. (2006), Dst model for 1995–2002, *J. Geophys. Res.*, 111, A04221, doi:10.1029/2005JA011257
- Weygand J.M., McPherron R.L. (2006), Dependence of ring current asymmetry on storm phase, *J. Geophys. Res.*, 111, A11221, doi:10.1029/2006JA011808