

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 φ_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, φ_1 максимальных значений приходится на ~ 18 мая, $R_2=1.75$ нТл, φ_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 φ_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.

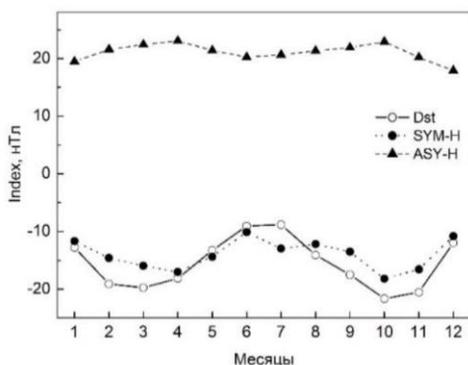


Рисунок 1. Сезонные изменения индексов Dst, SYM-H и ASY-H за весь рассматриваемый период, Index – один из этих индексов.

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.

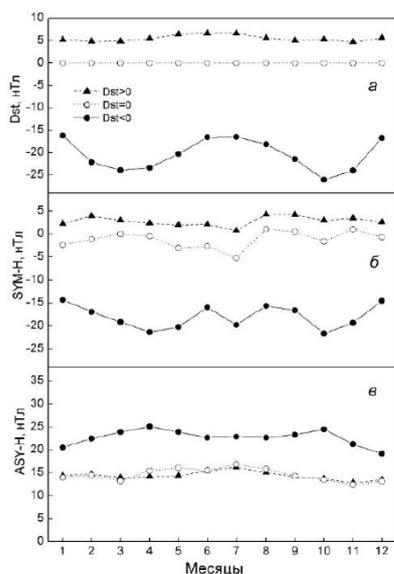


Рисунок 2. Сезонные изменения индексов Dst (а), SYM-H (б) и ASY-H (в) при разных значениях Dst.

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° , 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 ± 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].

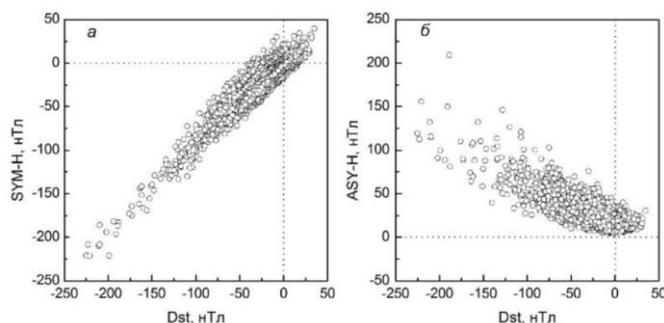


Рисунок 3. Сравнение среднесуточных значений индексов Dst и SYM-H (а), Dst и ASY-H (б). Пунктирные прямые нанесены относительно нулевых значений индексов.

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.

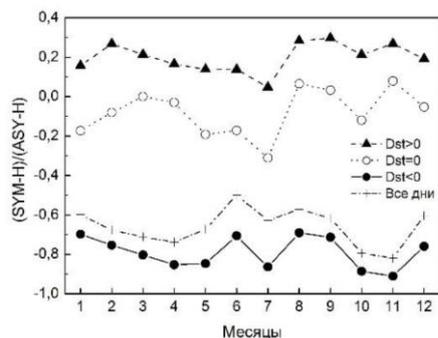


Рисунок 4. Сезонные изменения отношения индексов (SYM-H)/(ASY-H) при разных значениях Dst.

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