

## ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ ФАКТОР В СЕЗОННЫХ ВАРИАЦИЯХ СРЕДНЕСУТОЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ИНДЕКСА *Dst*

### GEOMETRIC FACTOR IN SEASONAL VARIATIONS OF DAILY AVERAGE VALUES OF THE GEOMAGNETIC INDEX *Dst*

Г.А. Макаров

Институт космических исследований и аэронауки  
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,  
Якутск, Россия, gmakarov@ikfia.ysn.ru

G.A. Makarov

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research  
and Aeronomy SB RAS,  
Yakutsk, Russia, gmakarov@ikfia.ysn.ru

**Аннотация.** В работе рассматриваются данные по геомагнитному индексу *Dst* за период 1966–2015 гг. В спокойных условиях на возникновение сезонных вариаций среднесуточных значений *Dst*-индекса влияют геометрические факторы взаимодействия солнечного ветра и магнитосферы, а при усилении возмущенности — развитие частичного кольцевого тока в магнитосфере. При больших отрицательных значениях *Dst*-индекса его сезонный ход отсутствует. Предполагается, что неравномерность сети станций, по данным которых рассчитывается *Dst*-индекс, приводит к образованию его годовой вариации. Образование полугодовой вариации связано с перемещением плазменного слоя относительно плоскости геомагнитного экватора при обороте Земли вокруг Солнца. По данным о полугодовых вариациях числа дней  $n(Dst)$  определено критическое среднесуточное значение геомагнитного индекса *Dst*, начиная с которого день можно считать возмущенным:  $Dst \leq -24$  нТл.

**Ключевые слова:** геомагнитный индекс *Dst*, полугодовая вариация магнитной активности.

**Abstract.** The work uses data on the geomagnetic index *Dst* for the period 1966–2015. Under quiet conditions, the occurrence of seasonal variations of the daily average *Dst* index depends on geometric factors of the interaction between the solar wind and the magnetosphere; and under disturbed conditions, on the development of a partial ring current in the magnetosphere. At large negative values of the *Dst* index, there is no seasonal variation in it. The imperfection of the network of *Dst* stations is assumed to lead to the formation of annual variation in *Dst*. The formation of a semiannual variation is associated with the movement of the plasma sheet relative to the plane of the geomagnetic equator during the annual rotation of Earth around the Sun. Based on the data on semiannual variations in the number of days  $n(Dst)$ , the critical daily average value of the geomagnetic index *Dst* is determined, starting from which we can speak of disturbed days:  $Dst \leq -24$  nT.

**Keywords:** geomagnetic index *Dst*, semiannual variation of magnetic activity.

## ВВЕДЕНИЕ

Интересной особенностью сезонных изменений геомагнитной активности является их полугодовая вариация с максимумами вблизи периодов равноденствий. Полугодовая вариация проявляется во всех широтных зонах и характерна для всех известных геомагнитных индексов. Исследование ее причин началось более века назад, однако вопрос о механизмах ее возникновения по-прежнему остается открытым. Все предложенные механизмы возникновения полугодовой вариации геомагнитной активности обычно подразделяют на три класса: аксиальные [Cortie, 1912]; равноденственные [Bartels, 1932]; механизм Рассела—Мак-Феррона [Russell, McPherron, 1973]. Более вероятным представляется комбинированное воздействие различных механизмов [Miyagawa, 1974; Simon, Legrand, 1989; Cliver et al., 2000; Svalgaard et al., 2002; Данилов, Макаров, 2006; Petrukovich, Zakharov, 2007], в связи с чем важным является уточнение вклада механизмов каждого класса.

Кроме полугодовой вариации, геомагнитная активность имеет годовую вариацию, фаза максимума которой у разных индексов наблюдается в разные периоды и определяется широтой и геометрией сети станций, по данным которых вычисляется тот или иной индекс.

Геомагнитная активность — существенный фактор в солнечно-земных процессах. Исследование солнечно-земных связей и проявлений космической погоды часто проводится статистическими методами с использованием среднесуточных значений земных, межпланетных и солнечных параметров. Но при суточном усреднении земных параметров разные фазы геомагнитных бурь могут накладываться, параметры бури (фазы, интенсивность, длительность и др.) будут в значительной мере нивелироваться и результаты будут отличаться от результатов, получаемых при обработке отдельно по фазам геомагнитных бурь или относительно какого-либо реперного момента в развитии бури. В связи с этим представляется важным исследовать изменения среднесуточных значений низкоширотного геомагнитного индекса *Dst*. В настоящей статье рассматриваются сезонные вариации двух характеристик *Dst*-индекса — частоты появления и величины.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

В работе используются данные по *Dst*-индексу [Sugiura, Kamei, 1991], полученные из Мирового центра данных по геомагнетизму в Киото, Япония,

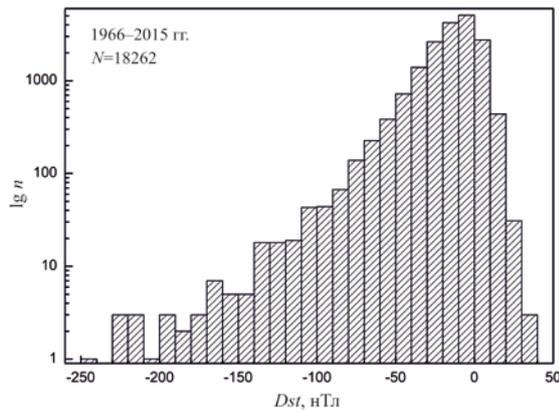


Рис. 1. Распределение среднесуточных значений индекса *Dst* по величине в логарифмическом масштабе, *N* — общее число дней в период 1966–2015 гг.

за 1966–2015 гг. [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>]. На рис. 1 приведено распределение числа *n* среднесуточных значений индекса *Dst* по величине за 1966–2015 гг. Всего было рассмотрено 18262 дня. Число дней с *Dst*>0 составило ~17.66 %, с *Dst*≈0 — ~2.34 % и с *Dst*<0 — ~80.0 %.

### СЕЗОННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ДНЕЙ

На рис. 2 показаны сезонные распределения числа дней *n* с положительными и отрицательными среднесуточными значениями *Dst*. Видно, что число дней с положительными значениями *Dst* максимально в периоды солнцестояний, причем летний максимум значительно превосходит зимний, тогда как число дней с отрицательными значениями *Dst* максимально в периоды равноденствий. Гармонический анализ этих рядов показал, что сезонные изменения числа дней хорошо аппроксимируются первыми двумя гармониками. В случае  $n(Dst > 0)$  амплитуда первой гармоники  $R_1 = 102.6$ , фаза максимума  $\varphi_1$  приходится на 11 июня, амплитуда второй гармоники  $R_2 = 94.1$ , фаза максимума  $\varphi_2 \sim 9$  июня (декабря), тогда как в случае  $n(Dst < 0)$  соответственно  $R_1 = 99.0$ ,  $\varphi_1 \sim 4$  декабря,  $R_2 = 91.7$ ,  $\varphi_2 \sim 14$  марта (сентября). Амплитуды гармоник выражены в днях. Как видно, в обоих случаях амплитуды первых и вторых гармоник примерно равны, а фазы соответствующих гармоник противоположны, причем для отрицательных значений *Dst* фазы максимумов второй гармоники близки к периодам равноденствий (~21 марта и ~22 сентября) и к периодам, когда гелиоширота Земли достигает наибольших значений (5–7 марта и 6–8 сентября).

С целью более подробного изучения сезонной динамики *n* в зависимости от уровня магнитной возмущенности были получены распределения *n* для отдельных диапазонов среднесуточных значений индекса *Dst*, показанные на рис. 3.

Наглядно видно, что распределения *n* различаются по диапазонам: при небольшом уровне возмущенности (рис. 3, а, б) гистограммы подобны гистограмме  $n(Dst > 0)$  (рис. 2, а), а при более высоких уровнях — гистограмме  $n(Dst < 0)$  (рис. 2, б). Результаты гармонического анализа распределений *n* для этих выборок приведены на рис. 4 и в таблице.

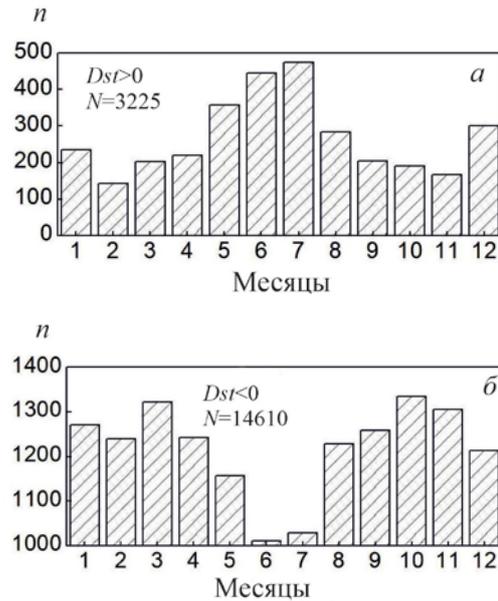


Рис. 2. Сезонные распределения числа дней *n* с положительными (а) и отрицательными (б) среднесуточными значениями *Dst*; *N* — число дней в выборке

На рис. 4 видно, что амплитуды 1-й и 2-й гармоник сезонных распределений числа дней *n* с возрастанием абсолютного значения  $\langle Dst \rangle$  изменяются сложным образом: при низком уровне возмущенности  $R_1$  и  $R_2$  растут, затем, по мере роста возмущенности, начинают спадать, а при высоком уровне возмущенности не меняются.

Отношение амплитуд гармоник к *n* позволяет учесть число дней *n* в отдельных диапазонах значений *Dst*. Видно (см. таблицу), что отношение  $R_1/n$  практически не зависит от уровня возмущенности, тогда как отношение  $R_2/n$  при низком уровне возмущенности с ростом геомагнитной активности сначала уменьшается, а затем, начиная с четвертой группы ( $\langle Dst \rangle$  меньше -20 нТл), неуклонно возрастает. Отношение амплитуд гармоник  $R_2/R_1$ , начиная с четвертой группы активности, с повышением магнитной возмущенности также демонстрирует возрастание, причем при высоком уровне возмущенности амплитуда 2-й гармоники сезонных распределений числа дней *n* существенно превышает амплитуду 1-й гармоники.

Фаза максимума 1-й гармоники при слабой возмущенности наблюдается в летнее солнцестояние, но при умеренных и сильных возмущениях меняется на 180° и наблюдается в зимнее солнцестояние. Седьмая точка — выброс (малая статистика); шестая и восьмая точки приходятся на начало февраля — конец января, т. е. не выбиваются из общей закономерности и располагаются около зимнего солнцестояния.

Поведение фазы 2-й гармоники имеет отчетливо выраженные особенности: при низкой возмущенности (первые три точки, когда  $Dst > -20$  нТл) максимумы сезонного хода наблюдаются в солнцестояния, а при средней и высокой возмущенности — точно в равноденствия, среднее значение для пяти выборок  $\langle \varphi_2 \rangle = 3.73$  мес., что соответствует 22 марта (сентября). Этот переход фазы характеризует критический уровень среднесуточной возмущенности,

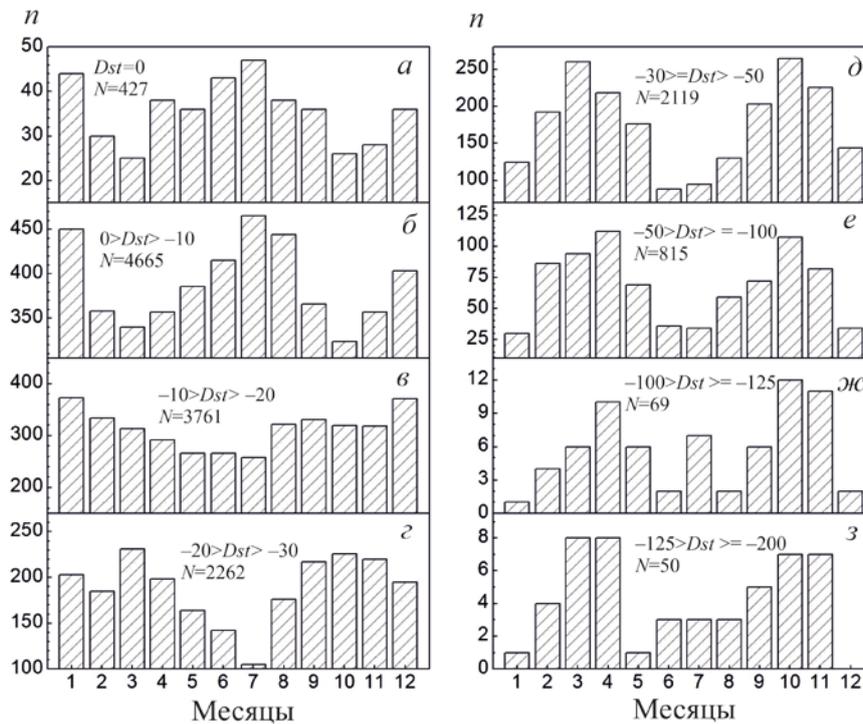


Рис. 3. Сезонные распределения числа дней  $n$  для отдельных диапазонов среднесуточных значений  $Dst$ ; на каждой панели (а–з) приведены диапазоны значений  $Dst$  в нТл и число дней  $N$  в соответствующей выборке

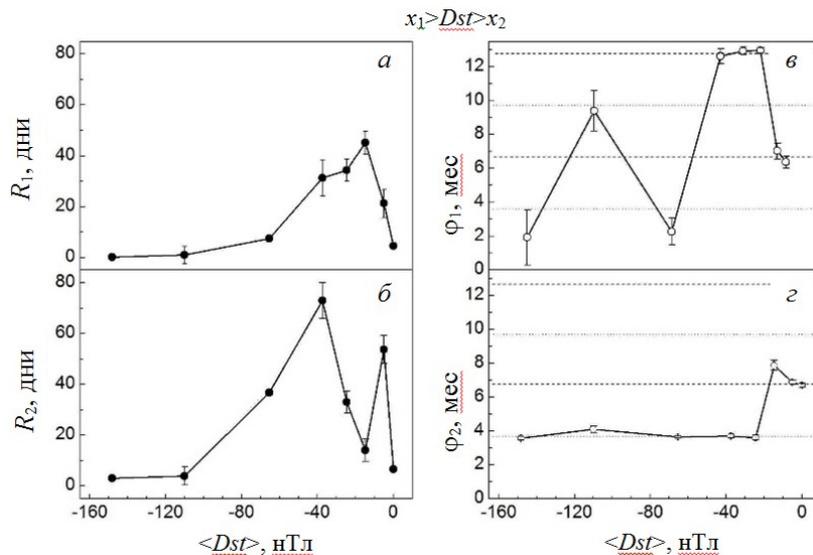


Рис. 4. Изменение амплитуд ( $R_1$  и  $R_2$ ) и фаз ( $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ ) первой и второй гармоник сезонных распределений числа дней  $n$  в зависимости от среднего значения  $\langle Dst \rangle$  в выделенном диапазоне значений. В правой части рисунка штриховыми линиями показаны периоды солнцестояний, пунктирными — равноденствий; для  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  указаны порядковые номера месяцев. Приведены среднеквадратичные отклонения средних

Среднее значение  $\langle Dst \rangle$  и относительные амплитуды 1-й ( $R_1/n$ ) и 2-й ( $R_2/n$ ) гармоник сезонных ходов  $n$  в отдельных диапазонах среднесуточных значений индекса  $Dst$  (уровнях магнитной возмущенности)

№	Уровень возмущенности, нТл	$\langle Dst \rangle$ , нТл	$R_1/n$	$R_2/n$	$R_2/R_1$
1	$Dst=0$	0.00	0.0105	0.0156	1.4778
2	$0 > Dst > -10$	-5.02	0.0046	0.0115	2.5342
3	$-10 > Dst > -20$	-14.69	0.0120	0.0038	0.3130
4	$-20 > Dst > -30$	-24.59	0.0152	0.0146	0.9638
5	$-30 \geq Dst > -50$	-37.41	0.0148	0.0345	2.3350
6	$-50 > Dst \geq -100$	-65.41	0.0091	0.0450	4.9474
7	$-100 > Dst \geq -125$	-110.00	0.0136	0.0571	4.1915
8	$-125 > Dst \geq -200$	-148.20	0.0028	0.0608	21.7143

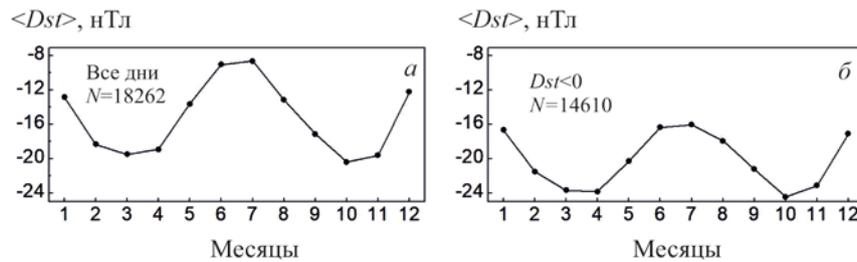


Рис. 5. Сезонные вариации среднесуточных значений  $Dst$ -индекса для всех дней (а) и для случая  $Dst < 0$  (б);  $N$  — число дней в выборке

т. е., начиная с уровня  $-20$  нТл  $> Dst > -30$  нТл, можно говорить о существенном развитии кольцевого тока. Анализ гистограмм числа дней со значениями  $\langle Dst \rangle$  от  $-20$  до  $-26$  нТл позволил уточнить этот критический уровень:  $\langle Dst \rangle \approx -24$  нТл. Таким образом, полугодовая вариация числа дней  $n$  с максимумами в равноденствия для среднесуточных значений индекса  $Dst$  начинается с  $\langle Dst \rangle \approx -24$  нТл. При работе со среднесуточными данными это значение может рассматриваться как пороговое при оценке уровня возмущенности: дни, когда  $\langle Dst \rangle$  меньше  $-24$  нТл, можно считать возмущенными.

### СЕЗОННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ $Dst$ -ИНДЕКСА

Рассмотрим сезонные вариации индекса  $Dst$ . На рис. 5 приведены сезонные вариации среднесуточных значений  $Dst$  за весь период (а) и для дней с  $\langle Dst \rangle < 0$  нТл (б). В обоих случаях наглядно видны полугодовые волны. Согласно расчетам, амплитуда 1-й гармоники сезонного хода  $\langle Dst \rangle$  для всех дней равна  $2.68$  нТл, фаза минимальных значений приходится на 17 декабря, тогда как для случая  $Dst < 0$   $R_1 = 1.17$  нТл, а фаза минимума приходится на 4 января; амплитуда 2-й гармоники сезонного хода для всех дней равна  $4.82$  нТл, фаза минимума приходится на 18 марта (сентября); в то время как для случая  $Dst < 0$   $R_2 = 4.03$  нТл и фаза минимума наблюдается 22 марта (сентября). В обоих случаях 1-я гармоника свидетельствует о том, что наибольшее возмущение имеет место в период зимнего солнцестояния, а 2-я гармоника наблюдается в период весеннего и осеннего равноденствий. И в обоих случаях амплитуда 2-й гармоники превышает амплитуду 1-й гармоники: для всех дней в 1.8 раза, для случая  $Dst < 0$  в 3.4 раза.

На рис. 6 приведены сезонные вариации  $Dst$ -индекса для отдельных диапазонов среднесуточных значений. Можно видеть, что кривые для различных диапазонов среднесуточных значений  $Dst$  ведут себя по-разному. В первых пяти диапазонах (рис. 6, а–д) минимальные значения  $\langle Dst \rangle$  наблюдаются в периоды равноденствий, в двух следующих (рис. 6, е, ж) — ближе к периодам солнцестояний, а в последнем диапазоне (рис. 6, з) полугодовой волны в сезонном ходе  $Dst$ -индекса вовсе не заметно. Такая динамика  $Dst$ -индекса, по-видимому, отражает влияние разных факторов: в спокойных условиях — геометрических факторов взаимодействия солнечного ветра и магнитосферы, а с ростом возмущенности — ча-

стичного кольцевого тока в магнитосфере. Развитие кольцевого тока во время геомагнитных бурь, наклонение его при этом в широтном направлении и смещение в утреннюю и вечернюю стороны рассмотрены в работе [Liu et al., 2019] на основании данных коллаборации SuperMAG. Но поскольку размахи сезонных изменений  $Dst$ -индекса малы и не превышают 2 % от среднего значения  $\langle Dst \rangle$  в каждом диапазоне значений (см. таблицу), то в данной работе будут обсуждаться вариации  $Dst$ , представленные на рис. 5. Заметим, что закономерности, отмеченные по данным рис. 3 и 6, были проверены на воспроизводимость путем расширения в два раза диапазонов среднесуточных значений  $Dst$ -индекса и результаты получились подобными рассматриваемым.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Как видим, сезонные изменения числа дней  $n$  и среднесуточных значений  $Dst$ -индекса характеризуются годовыми и полугодовыми вариациями. При этом годовые и полугодовые вариации  $n$  обладают сравнимыми амплитудами. В спокойные периоды и при низком уровне возмущенности годовые вариации  $n$  имеют максимумы в летнее солнцестояние, однако с ростом возмущенности максимумы наблюдаются вблизи зимнего солнцестояния. Летний максимум  $n$  можно объяснить тем, что в спокойные периоды в отсутствие кольцевого тока индекс  $Dst$ , вероятно, формируется в результате воздействия токов магнитопаузы и остаточного  $Sq$ -поля (например, [Chen, 2004]).

С ростом возмущенности на возникновение вариаций  $Dst$ -индекса начинает влиять геометрия сети станций, по данным которых рассчитывается индекс. Ранее в работах [Данилов, Макаров, 1984, 1992] было показано, что годовая вариация  $Dst$ -индекса образуется вследствие неравномерности сети станций: три из четырех станций располагаются в Северном географическом полушарии. Преобладание числа северных станций приводит к возникновению годовой вариации  $Dst$  с наибольшей депрессией в зимнее солнцестояние (рис. 5). Действительно, если предположить, что частичный кольцевой ток расположен, подобно плазменному слою, в плоскости, ориентированной по направлению потока солнечной плазмы (рис. 7), то в зимние месяцы ночная часть магнитосферы, где расположен частичный кольцевой ток, проецируется в Северное полушарие. В результате низкоширотные станции Северного полушария регистрируют большую депрес-

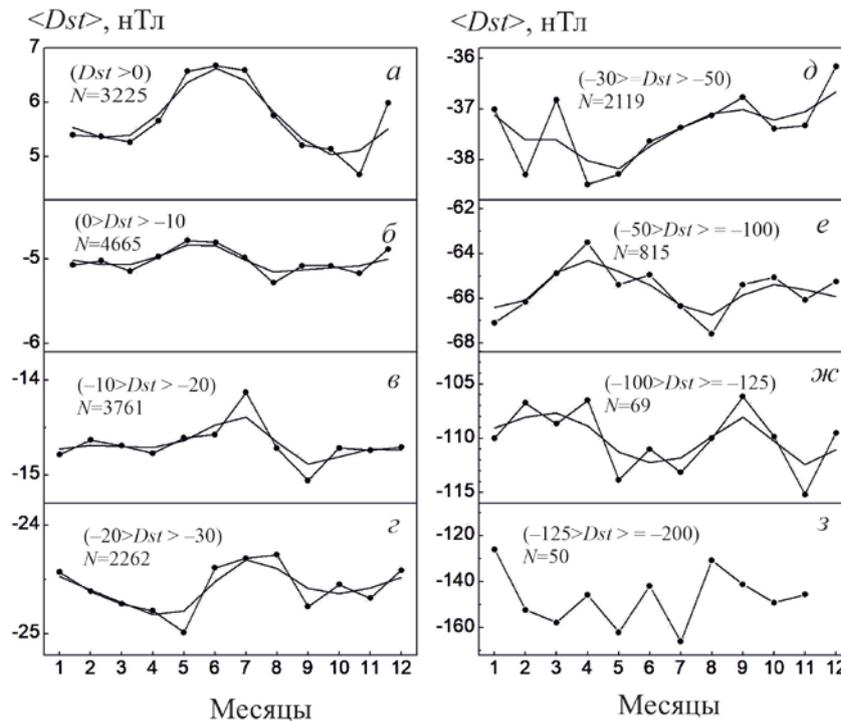


Рис. 6. Сезонные вариации среднесуточных значений *Dst*-индекса для отдельных диапазонов значений: ломаные линии с точками — экспериментальные данные; более плавные кривые — сглаженные значения. На каждой панели приведены диапазоны значений *Dst* в нТл и число дней в выборке *N*

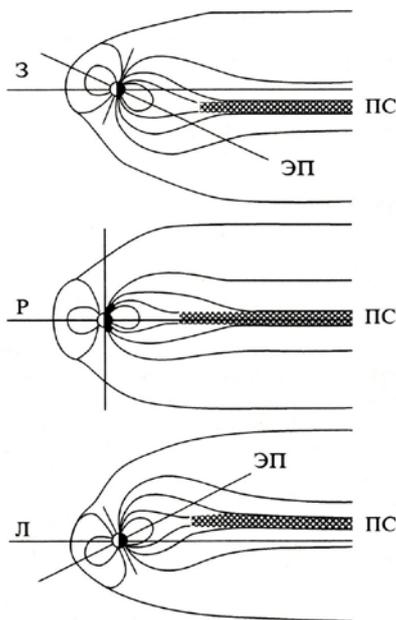


Рис. 7. Схематическое расположение плазменного слоя (ПС) магнитосферы относительно экваториальной плоскости (ЭП) зимой (З), в равноденствия (Р) и летом (Л) [Данилов, Макаров, 2006]

сию геомагнитного поля, чем станции Южного полушария.

Влияние геометрии сети станций на образование годовой и суточной вариаций *Dst* изучалось также в работах других авторов. Например, в работе [Mayaud, 1978] предполагается, что суточное изменение *Dst*-индекса, вероятно, связано с асимметричной частью кольцевого тока, которая не усредняется из-за неравномерного продольного распределения

станций. Mursula, Karinen [2005] показали, что из-за сезонного изменения магнитного поля на станциях и из-за ошибочной обработки кривой спокойного времени при построении *Dst*-индекса возникает «небуревая компонента» *Dst*-вариаций, которая составляет почти половину полугодовой вариации. В работе [Hakkinen et al., 2003] было показано, что на разных станциях средние уровни *Dst*-индекса различаются примерно на 10 нТл из-за того, что станции имеют разные базовые уровни *Dst*; для устранения вековой вариации был предложен новый метод, который позволяет скорректировать сезонную изменчивость *Dst*-индекса примерно на 3 нТл. Кроме того, для исключения различий по полушариям во время зимнего и летнего солнцестояния предлагается дополнить сеть двумя станциями в Южном полушарии.

Рассмотрим поведение фазы максимума 2-й гармоники распределения числа дней  $\varphi_2(n)$  с ростом магнитной возмущенности (см. рис. 4, з). При слабой возмущенности максимумы сезонного хода наблюдаются в солнцестояния, а при умеренной и сильной возмущенности — в равноденствия. Среднесуточное значение  $\langle Dst \rangle \approx -24$  нТл определено как пороговое для оценки уровня возмущенности дня. Начиная с этого значения, можно говорить о существенном развитии кольцевого тока в магнитосфере. Согласно классификации геомагнитных бурь [Loewe, Prolss, 1997; Gonzalez et al., 1994], слабые бури развиваются, когда среднечасовое значение  $Dst \leq -30$  нТл. Заметим, что в данной классификации используется среднечасовое значение *Dst*, тогда как в настоящей работе возмущенность дня оценивается по среднесуточному значению *Dst*, следовательно, никакого противоречия не наблюдается.

Наблюдение максимумов полугодовой вариации  $n$  и минимальных значений  $Dst$  точно в периоды равноденствий 22 марта (сентября) свидетельствует в пользу равноденственного механизма возникновения этой вариации [Bartels, 1932]. По нашему предположению, полугодовая вариация образуется по следующей причине [Данилов, Макаров, 2006]. Как известно, частицы солнечного ветра поступают в хвост магнитосферы и в результате электрического дрейфа движутся в сторону Земли. По мере приближения к Земле энергия частиц растет. Поток энергичных частиц концентрируется возле нейтральной линии хвоста магнитосферы, образуя сравнительно тонкий плазменный слой энергичных частиц. В равноденственные периоды, когда земная ось располагается поперек линии Земля—Солнце, плазменный слой хвоста нацелен на геомагнитный экватор (см. рис. 7). В эти периоды направленная к Земле скорость потока частиц перпендикулярна силовым линиям дипольного магнитного поля и вероятность поступления частиц в магнитосферу наибольшая. В летний и зимний периоды, когда земная ось отклоняется от линии Земля—Солнце в сторону Солнца и от Солнца, плазменный слой смещается относительно плоскости геомагнитного экватора и скорость потока частиц уменьшается. В результате уменьшается вероятность поступления частиц в магнитосферу, соответственно уменьшается интенсивность частичного кольцевого тока. Так качественно можно описать образование полугодовой вариации  $Dst$  с минимальными значениями в периоды равноденствий. На примере  $K$ -индексов для среднеширотных станций было показано [Данилов, Макаров, 2006], что полугодовые вариации магнитной активности, связанные с изменением угла атаки солнечным ветром магнитосферы Земли, составляют 60 %, остальные 40 % связаны с изменением гелиошироты Земли. В настоящей работе такое соотношение проявилось в сезонном распределении числа дней  $n$  с отрицательными среднесуточными значениями  $Dst$  (см. рис. 2).

Объяснение, с точки зрения геометрии (рис. 7) подобное приведенному выше, 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 [Malin, Isikara, 1976]. Эффект Малина—Исикары был применен также для объяснения годовой и суточной  $Dst$ -вариаций [Mayaud, 1978; Cliver et al., 2001; Takalo, Mursula, 2001]. Различие схем, предложенных в работах [Данилов, Макаров, 2006] и [Malin, Isikara, 1976], состоит в том, что в первой работе учитывается 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, Макаров, 1984, 1992; Malin, Isikara, 1976] подтверждаются резуль-

татами работы [Liu et al., 2019], в которой были проанализированы данные коллаборации SuperMAG за 2000–2014 гг. и получено положение кольцевого тока по магнитной широте в периоды 67 интенсивных геомагнитных бурь.

Представляется, что пространственные и временные эффекты кольцевого и частичного кольцевого токов можно выявить по результатам исследований  $SYM$ - и  $ASY$ -индексов, которые определяются по данным одиннадцати низко- и среднеширотных геомагнитных станций. Такие исследования будут проведены нами в дальнейшем.

В данной работе не оценивается вклад в сезонные вариации индекса  $Dst$  механизма [Russell, McPherron, 1973], так как не учитывается направление магнитного поля в межпланетных секторах. Поскольку используются среднесуточные значения индекса  $Dst$  и большой массив данных, охватывающий 50 лет, то можно полагать, что в первом приближении эффекты секторов ММП, а также его южной и северной компонент компенсируются.

Таким образом, на возникновение сезонных вариаций среднесуточных значений геомагнитного индекса  $Dst$  в спокойных и умеренно-возмущенных условиях (до значения  $Dst > -50$  нТл) влияют геометрические факторы взаимодействия солнечного ветра и магнитосферы, а с ростом возмущенности возрастает влияние частичного кольцевого тока в магнитосфере. При больших отрицательных значениях  $Dst$ -индекса его сезонный ход отсутствует.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предполагается, что к образованию годовой вариации  $Dst$  с минимальными значениями в период зимнего солнцестояния приводит неравномерность сети станций, по данным которых рассчитывается  $Dst$ -индекс: три станции из четырех располагаются в Северном полушарии. Если частичный кольцевой ток расположен, подобно плазменному слою, в плоскости, ориентированной по направлению потока солнечной плазмы, то ночная часть магнитосферы, где расположен частичный кольцевой ток, в зимние месяцы будет проецироваться в Северное полушарие и низкоширотные станции этого полушария будут регистрировать большую депрессию геомагнитного поля, чем станции Южного полушария.

Предложено объяснение возникновения полугодовых вариаций числа дней с отрицательными и положительными среднесуточными значениями индекса  $Dst$  и величины  $Dst$ . Оно основано на учете перемещения плазменного слоя относительно плоскости геомагнитного экватора при годовом обращении Земли вокруг Солнца, соответствующего изменению вероятности поступления частиц в магнитосферу и последующему изменению интенсивности частичного кольцевого тока. Наибольшая вероятность поступления частиц в магнитосферу имеет место в периоды равноденствий, наименьшая — в периоды солнцестояний.

По данным о полугодовых вариациях числа дней  $n(Dst)$  определено критическое среднесуточное значение геомагнитного индекса  $Dst$ , начиная с которого день можно считать возмущенным:  $Dst \leq -24$  нТл.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Данилов А.А., Макаров Г.А. Секторная структура ММП и кольцевой ток в магнитосфере // Физические процессы в околоземной плазме: сб. науч. тр. Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1984. С. 28–40.

Данилов А.А., Макаров Г.А. О влиянии распределения геомагнитных обсерваторий на суточные и сезонные вариации *Dst*-индекса // Магнитосферные исследования: сб. науч. тр. М.: МГК РАН, 1992. № 18. С. 125–129.

Данилов А.А., Макаров Г.А. Зависимость магнитной активности от расположения плазменного слоя относительно геомагнитного экватора // Геомагнетизм и аэронавигация. 2006. Т. 46, № 2. С. 168–174.

Bartels J. Terrestrial magnetic activity and its relations to solar phenomena // *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. 1932. V. 37, N 1. P. 1–52.

Chen H.-F. Analysis of the diurnal and semiannual variations of *Dst* index at different activity levels // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109, A03212. DOI: [10.1029/2003JA009981](https://doi.org/10.1029/2003JA009981).

Cliver E.W., Kamide Y., Ling A.G. Mountains versus valleys: Semiannual variation of geomagnetic activity // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105, N A2. P. 2413–2424. DOI: [10.1029/1999JA900439](https://doi.org/10.1029/1999JA900439).

Cliver E.W., Kamide Y., Ling A.G., Yokoyama N. Semiannual variation of the geomagnetic *Dst* index: Evidence for a dominant nonstorm component // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106, N A10. P. 21297–21304. DOI: [10.1029/2000JA000358](https://doi.org/10.1029/2000JA000358).

Cortie A.L. Sun-spots and terrestrial magnetic phenomena 1898–1911: The cause of the annual variation of magnetic disturbances // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1912. V. 73. P. 52–60. DOI: [10.1093/mnras/73.1.52](https://doi.org/10.1093/mnras/73.1.52).

Gonzalez W.D., Joselin J.A., Kamide Y., et al. What is a geomagnetic storm? // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99, N A4. P. 5771–5792. DOI: [10.1029/93JA02867](https://doi.org/10.1029/93JA02867).

Hakkinen L.V.T., Pulkkinen T.I., Pirjola R.J., et al. Seasonal and diurnal variation of geomagnetic activity: Revised *Dst* versus external drivers // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, N A2, 1060. DOI: [10.1029/2002JA009428](https://doi.org/10.1029/2002JA009428).

Liu B.J., Zhang X.X., He F. Tilt of the ring current during the main phases of intense geomagnetic storms // *Science China. Technological Sciences*. 2019. V. 62, N 5. P. 820–828. DOI: [10.1007/s11431-018-9344-5](https://doi.org/10.1007/s11431-018-9344-5).

Loewe C.A., Prolss G.W. Classification and mean behavior of magnetic storms // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102, N A7. P. 14209–14213. DOI: [10.1029/96JA04020](https://doi.org/10.1029/96JA04020).

Malin S.R.C., Isikara A.M. Annual variation of the geomagnetic field // *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 1976. V. 47. P. 445–457. DOI: [10.1111/j.1365-246X.1976.tb07096.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1976.tb07096.x).

Mayaud P.N. The annual and daily variations of the *Dst* index // *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 1978. V. 55. P. 193–201. DOI: [10.1111/j.1365-246X.1978.tb04757.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1978.tb04757.x).

Murayama T. Origin of the semiannual variation of geomagnetic  $K_p$  indices // *J. Geophys. Res.* 1974. V. 79, N 1. P. 297–300. DOI: [10.1029/JA079i001p00297](https://doi.org/10.1029/JA079i001p00297).

Mursula K., Karinen A. Explaining and correcting the excessive semiannual variation in the *Dst* index // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32, L14107. DOI: [10.1029/2005GL023132](https://doi.org/10.1029/2005GL023132).

Petrukovich A.A., Zakharov M.Y.  $a_p$ -index solar wind driving function and its semiannual variations // *Ann. Geophys.* 2007. V. 25, iss. 7. P. 1465–1469. DOI: [10.5194/angeo-25-1465-2007](https://doi.org/10.5194/angeo-25-1465-2007).

Russell C.T., McPherron R.L. Semiannual variation of geomagnetic activity // *J. Geophys. Res.* 1973. V. 78, N 1. P. 92–108. DOI: [10.1029/JA078i001p00092](https://doi.org/10.1029/JA078i001p00092).

Simon P.A., Legrand J.-P. Solar cycle and geomagnetic activity: A review for geophysicists. Part II. The solar sources of geomagnetic activity and their links with sunspot cycle activity // *Ann. Geophys.* 1989. V. 7, iss. 6. P. 579–594.

Sugiura M., Kamei T. Equatorial *Dst* index 1957–1986 // *IGA Bull.* 1991. N 40. P. 7–14.

Svalgaard L., Cliver E.W., Ling A.G. The semiannual variation of great geomagnetic storms // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29, N 16, 1765. DOI: [10.1029/2001GL014145](https://doi.org/10.1029/2001GL014145).

Takalo J., Mursula K. A model for the diurnal universal time variation of the *Dst* index // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106, N A6. P. 10905–10921. DOI: [10.1029/2000JA000231](https://doi.org/10.1029/2000JA000231).

URL: <http://wcd.kugi.kyoto-u.ac.jp> (дата обращения 5 июня 2020 г.).

## REFERENCES

Bartels J. Terrestrial magnetic activity and its relations to solar phenomena. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. 1932, vol. 37, iss. 1, pp. 1–52.

Chen H.-F. Analysis of the diurnal and semiannual variations of *Dst* index at different activity levels. *J. Geophys. Res.* 2004, vol. 109, A03212. DOI: [10.1029/2003JA009981](https://doi.org/10.1029/2003JA009981).

Cliver E.W., Kamide Y., Ling A.G. Mountains versus valleys: Semiannual variation of geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.* 2000, vol. 105, iss. A2, pp. 2413–2424. DOI: [10.1029/1999JA900439](https://doi.org/10.1029/1999JA900439).

Cliver E.W., Kamide Y., Ling A.G., Yokoyama N. Semiannual variation of the geomagnetic *Dst* index: Evidence for a dominant nonstorm component. *J. Geophys. Res.* 2001, vol. 106, iss. A10, pp. 21297–21304. DOI: [10.1029/2000JA000358](https://doi.org/10.1029/2000JA000358).

Cortie A.L. Sun-spots and terrestrial magnetic phenomena 1898–1911: The cause of the annual variation of magnetic disturbances. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1912, vol. 73, pp. 52–60. DOI: [10.1093/mnras/73.1.52](https://doi.org/10.1093/mnras/73.1.52).

Danilov A.A., Makarov G.A. Sector structure of IMF and ring current in magnetosphere. *Fizicheskie protsessy v okolozemnoi plazme* [Physical processes in near-Earth plasma], Yakutsk, 1984, pp. 28–40. (In Russian).

Danilov A.A., Makarov G.A. On the effect of the distribution of geomagnetic observatories on diurnal and seasonal variations of the *Dst*-index. *Magnitofernye issledovaniya* [Magnetospheric research], Moscow, 1992, no. 18, pp. 125–129. (In Russian).

Danilov A.A., Makarov G.A. Dependence of magnetic activity on the plasma sheet location relative to the geomagnetic equator. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2006, vol. 46, iss. 2, pp. 159–165. DOI: [10.1134/S0016793206020046](https://doi.org/10.1134/S0016793206020046).

Gonzalez W.D., Joselin J.A., Kamide Y., Kroehl H.W., Rostoker G., Tsurutani B.T., Vasyliunas V.M. What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.* 1994, vol. 99, iss. A4, pp. 5771–5792. DOI: [10.1029/93JA02867](https://doi.org/10.1029/93JA02867).

Hakkinen L.V.T., Pulkkinen T.I., Pirjola R.J., Nevanlinna H., Tanskanen E.I., Turner N.E. Seasonal and diurnal variation of geomagnetic activity: Revised *Dst* versus external drivers. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, iss. A2, 1060. DOI: [10.1029/2002JA009428](https://doi.org/10.1029/2002JA009428).

Liu B.J., Zhang X.X., He F. Tilt of the ring current during the main phases of intense geomagnetic storms. *Science China. Technological Sciences*. 2019, vol. 62, iss. 5, pp. 820–828. DOI: [10.1007/s11431-018-9344-5](https://doi.org/10.1007/s11431-018-9344-5).

Loewe C.A., Prolss G.W. Classification and mean behavior of magnetic storms. *J. Geophys. Res.* 1997, vol. 102, iss. A7, pp. 14209–14213. DOI: [10.1029/96JA04020](https://doi.org/10.1029/96JA04020).

Malin S.R.C., Isikara A.M. Annual variation of the geomagnetic field. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 1976, vol. 47, pp. 445–457. DOI: [10.1111/j.1365-246X.1976.tb07096.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1976.tb07096.x).

Mayaud P.N. The annual and daily variations of the *Dst* index. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 1978, vol. 55, pp. 193–201. DOI: [10.1111/j.1365-246X.1978.tb04757.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1978.tb04757.x).

Murayama T. Origin of the semiannual variation of geomagnetic  $K_p$  indices. *J. Geophys. Res.* 1974, vol. 79, iss. 1, pp. 297–300. DOI: [10.1029/JA079i001p00297](https://doi.org/10.1029/JA079i001p00297).

Mursula K., Karinen A. Explaining and correcting the excessive semiannual variation in the *Dst* index. *Geophys. Res. Lett.* 2005, vol. 32, L14107. DOI: [10.1029/2005GL023132](https://doi.org/10.1029/2005GL023132).

Petrukovich A.A., Zakharov M.Y.  $a_p$ -index solar wind driving function and its semiannual variations. *Ann. Geophys.* 2007, vol. 25, iss. 7, pp. 1465–1469. DOI: [10.5194/angeo-25-1465-2007/](https://doi.org/10.5194/angeo-25-1465-2007/)

Russell C.T., McPherron R.L. Semiannual variation of geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.* 1973, vol. 78, iss. 1, pp. 92–108. DOI: [10.1029/JA078i001p00092](https://doi.org/10.1029/JA078i001p00092).

Simon P.A., Legrand J.-P. Solar cycle and geomagnetic activity: A review for geophysicists. Part II: The solar sources of geomagnetic activity and their links with sunspot cycle activity. *Ann. Geophys.* 1989, vol. 7, iss. 6, pp. 57–594.

Sugiura M., Kamei T. Equatorial *Dst* index 1957–1986. *IAGA Bull.* 1991, no. 40, pp. 7–14.

Svalgaard L., Cliver E.W., Ling A.G. The semiannual variation of great geomagnetic storms. *Geophys. Res. Lett.* 2002, vol. 29, iss. 16, 1765. DOI: [10.1029/2001GL014145](https://doi.org/10.1029/2001GL014145).

Takalo J., Mursula K. A model for the diurnal universal time variation of the *Dst* index. *J. Geophys. Res.* 2001, vol. 106, iss. A6, pp. 10905–10921. DOI: [10.1029/2000JA000231](https://doi.org/10.1029/2000JA000231).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> (accessed June 5, 2020).

*Как цитировать эту статью:*

Макаров Г.А. Геометрический фактор в сезонных вариациях среднесуточных значений геомагнитного индекса *Dst*. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 4. С. 59–66. DOI: [10.12737/szf-64202008](https://doi.org/10.12737/szf-64202008).