

СМЕЩЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ГЕОМАГНИТНЫХ ИНДЕКСОВ МАГНИТОСФЕРНОГО КОЛЬЦЕВОГО ТОКА

OFFSETS IN THE GEOMAGNETIC INDICES OF THE MAGNETOSPHERIC RING CURRENT

Г.А. Макаров

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

G.A. Makarov

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

Аннотация. В работе рассматриваются изменения среднесуточных значений индексов Dst , $SYM-H$, $ASY-H$ и $ASY-D$ и их зависимость от уровня магнитной возмущенности за период 1981–2016 гг. Эти индексы являются геомагнитными характеристиками магнитосферного кольцевого тока. Установлено, что индексы асимметричной компоненты кольцевого тока $ASY-H$ и $ASY-D$ в относительно магнитно-спокойные периоды не равны нулю. Определены смещения значений в зависимостях индексов $ASY-H$ и $ASY-D$ от уровня магнитной возмущенности. Анализируется поведение показателя степени симметрии кольцевого тока — отношения $SYM-H/ASY-H$ — в течение года при разных уровнях возмущенности. Обнаружено, что это отношение растет по абсолютной величине по мере возрастания возмущенности и при больших возмущениях (при $Dst < -50$) превышает 1.

Ключевые слова: геомагнитный индекс Dst , геомагнитные индексы SYM и ASY , магнитосферный кольцевой ток.

Abstract. The paper considers changes in the daily average values of the Dst , $SYM-H$, $ASY-H$, and $ASY-D$ indices and their dependence on the level of magnetic disturbance for the period 1981–2016. These indices are geomagnetic characteristics of the magnetospheric ring current. It has been established that the indices of the asymmetric component of the ring current $ASY-H$ and $ASY-D$ during relatively magnetically quiet periods are not equal to zero. The values of the offsets in the dependences of the $ASY-H$ and $ASY-D$ indices on the level of magnetic disturbance have been determined. The behavior of the index of the degree of symmetry of the ring current, the ratio $SYM-H/ASY-H$, is analyzed during the year at different levels of disturbance. This ratio has been found to grow in absolute value with increasing disturbance and to exceed 1 at large disturbances (at $Dst < -50$).

Keywords: geomagnetic index Dst , geomagnetic indices SYM and ASY , magnetospheric ring current.

ВВЕДЕНИЕ

Кольцевой ток является важной частью магнитосферы Земли. В периоды магнитных бурь он усиливается на основной фазе и возвращается в прежнее состояние на фазе восстановления [Базаржапов и др., 1979]. Геомагнитными характеристиками кольцевого тока являются индексы Dst , SYM и ASY : Dst отражает интенсивность кольцевого тока [Sugiura, Kamei, 1991], SYM и ASY позволяют выделять его симметричную и асимметричную компоненты [Iyemori et al., 1992].

Индексы Dst и SYM , ASY различаются временным разрешением и составом наземных сетей магнитных станций, по данным которых они определяются: Dst имеет часовое временное разрешение, а SYM и ASY — одноминутное разрешение; Dst рассчитывается по данным горизонтальной H -составляющей геомагнитного поля на четырех низкоширотных станциях, тогда как SYM и ASY подразделяются на $SYM-H$, $SYM-D$, $ASY-H$ и $ASY-D$ и рассчитываются по H - и D -составляющим геомагнитного поля на шести станциях (сеть состоит из более чем десяти станций). Важно отметить, что $SYM-H$ и $SYM-D$ представляют собой, по сути, усредненные отклоне-

ния H - и D -составляющих геомагнитного поля от спокойного уровня на станциях наблюдения с поправкой на геомагнитную широту, в то время как $ASY-H$ и $ASY-D$ определяются как диапазоны между максимальными и минимальными значениями H - и D -составляющих после вычета из поля возмущения соответствующих симметричных частей. Индекс $SYM-H$, как правило, имеет отрицательные значения (подобно Dst), $SYM-D$ принимает значения обоих знаков, а $ASY-H$ и $ASY-D$ имеют всегда положительные значения. Подробно методика определения индекса Dst приведена в работе [Sugiura, Kamei, 1991], а индексов SYM и ASY — в работе [Iyemori et al., 2010].

Изучая вариации индексов SYM , ASY и Dst , авторы работ [Weygand, McPherron, 2006; Iyemori et al., 2010] выявили, что в их значениях наблюдаются смещения. Согласно определению, данному в этих работах, смещение — это ненулевое значение индекса при магнитно-спокойных условиях. Было предположено, что смещения представляют собой суммарный вклад кольцевого тока и токовых систем магнитопаузы и хвоста, присутствующих в магнитосфере в спокойные от магнитных бурь периоды.

В теоретической работе [Maltsev et al., 1996] предложена формула для расчета Dst -индекса, учитывающая вклады кольцевого тока, токов магнитопаузы и поперечных токов магнитосферного хвоста. В спокойные периоды вклады этих источников могут составлять десятки нанотесла. В работе [Kalegaev et al., 2005] вычислены вклады в индекс Dst кольцевых, хвостовых токов и токов магнитопаузы с использованием трех моделей магнитосферного магнитного поля: параболоидной, событийно-ориентированной и модели Цыганенко T01. Все модели показывают значительный вклад хвостового тока, сравнимый с вкладом кольцевого тока во время умеренных магнитных бурь.

По спутниковым измерениям ионов кольцевого тока Greenspan, Hamilton [2000] получили, что хвостовые токи и токи магнитопаузы могут вызывать сильные магнитные возмущения, которые должны компенсировать часть поля кольцевого тока, тем самым создавая анизотропию кольцевого тока по времени суток.

Статистическое исследование влияния увеличения динамического давления солнечного ветра на асимметрию кольцевого тока на основе индекса $ASY-H$ [Shi et al., 2006] позволило обнаружить усиление асимметрии кольцевого тока, которое сильно зависит от северо-южной компоненты межпланетного магнитного поля. Было показано также, что на средних широтах вокруг местного полудня или полуночи в возмущения H и, соответственно, индекса $ASY-H$ часто дают значительный вклад продольные токи обеих областей или токового клина суббури.

В работе [Tsyganenko, Sitnov, 2005] при разработке динамической модели геомагнитного поля во время бури во внутренней магнитосфере были учтены вклады основных источников внешнего магнитного поля: магнитопаузы, поперечного токового слоя, осесимметричного и частичного кольцевого тока и токовых систем Биркеланда. Были рассчитаны ожидаемые изменения индекса Dst и сравнены с его фактическими значениями, совокупный коэффициент корреляции при этом оказался больше 0.92.

В работе [Dubayagin et al., 2014] с использованием эмпирических моделей магнитосферы Н.А. Цыганенко и др. был изучен относительный вклад различных токовых систем в индексы SYM и ASY . Было обнаружено, что вклад симметричного кольцевого тока в $SYM-H$ начинает увеличиваться около минимального значения $SYM-H$ и достигает своего максимума на фазе восстановления бури; ток поперек магнитосферного хвоста дает основной вклад в индекс $SYM-H$ на основной фазе. Dubayagin et al., [2014], однако, отмечают, что к этому результату следует относиться с осторожностью, поскольку модельная область 2 продольных токов, частичный кольцевой ток и системы поперечного тока перекрываются в окрестности геостационарной орбиты и сложно разделить их воздействие. Хорошее согласие между реальными индексами и рассчитанными с использованием моделей магнитосферы указывает на то, что чисто ионосферные токовые системы в среднем дают умеренный вклад в эти индексы. В работе [Haidusek

et al., 2017] на основе системы SWMF был смоделирован прогноз геомагнитных индексов K_p , $SYM-H$, AL и было обнаружено, что модель отлично справляется с предсказанием индекса $SYM-H$ со среднеквадратичной ошибкой 17–18 нТл.

Кольцевой ток является важным образованием в магнитосфере Земли и играет ключевую роль в развитии геомагнитных бурь. Изучение солнечно-земных связей и проявлений космической погоды будет неполным без учета свойств кольцевого тока. Такие исследования часто ведутся статистическими методами с использованием среднесуточных значений земных, межпланетных и солнечных параметров. При суточном усреднении земных параметров разные фазы геомагнитных бурь могут накладываться, поэтому особенности бурь (фазы, интенсивность, длительность и др.) будут в значительной мере нивелироваться. В этой связи представляется важным исследовать изменения среднесуточных значений геомагнитных индексов Dst , SYM и ASY .

Целью работы является оценка смещений значений индексов $SYM-H$, $ASY-H$ и $ASY-D$ по их среднесуточным данным.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

В работе используются среднечасовой индекс Dst и одноминутные индексы $SYM-H$, $SYM-D$, $ASY-H$, $ASY-D$ за 1981–2016 гг. Значения индексов получены из Мирового центра данных по геомагнетизму в Киото, Япония [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html>].

Была рассмотрена связь в нашей выборке между среднесуточными значениями индекса Dst и планетарного геомагнитного индекса A_p . Получено, что Dst прямо пропорционально растет по модулю с ростом A_p . Связь между индексами можно аппроксимировать линейным уравнением $Dst = -1.39A_p + 2.1$ при величине достоверности аппроксимации $R^2 = 0.987$, поэтому далее в качестве показателя магнитной возмущенности используется индекс Dst . Такой подход позволяет увидеть различия между рассматриваемыми индексами кольцевого тока.

В настоящей работе данные об индексах усреднены посуточно по шкале мирового времени (UT). Все данные были разбиты на девять групп в соответствии со среднесуточным значением Dst -индекса. Диапазоны изменений Dst , число дней N в каждой группе, а также средние значения индексов Dst и A_p в группах приведены в табл. 1.

Индекс $SYM-D$ в данной работе не рассматривается, поскольку, как показал предварительный анализ, при суточном усреднении $SYM-D$ имеет небольшие значения, изменяется в течение года несистематическим образом и совершенно не проявляет какой-либо зависимости от уровня магнитной возмущенности.

2. ВЫЯВЛЕНИЕ СМЕЩЕНИЙ ЗНАЧЕНИЙ $SYM-H$, $ASY-H$ И $ASY-D$

На рис. 1 приведены сезонные вариации среднесуточных значений индексов Dst , $SYM-H$, $ASY-H$

Таблица 1

Диапазоны изменений индекса Dst , число дней N , средние значения индексов Dst и A_p в группах магнитной активности

Группа магнитной активности	Диапазоны изменений Dst , нТл	Число дней N	Среднее значение Dst , нТл	Среднее значение A_p , нТл
1	>0	2307	5.5	5.6
2	0	321	0	5.5
3	$-10 \div -1$	3690	-5.5	7.1
4	$-20 \div -11$	2941	-15.1	11.0
5	$-30 \div -21$	1713	-25.0	16.5
6	$-50 \div -31$	1464	-38.4	23.5
7	$-100 \div -51$	608	-65.4	40.7
8	$-150 \div -101$	81	-117.5	90.3
9	<-150	24	-180.3	132.3

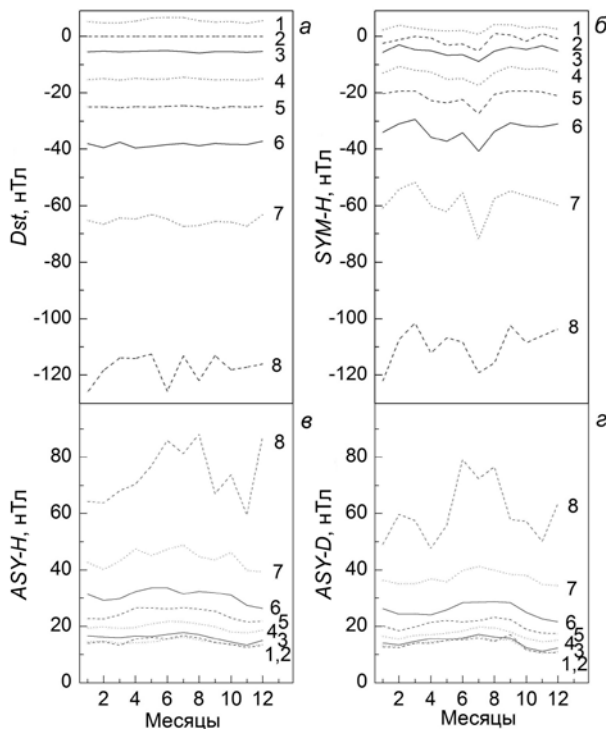


Рис. 1. Сезонные вариации индексов Dst (а), $SYM-H$ (б), $ASY-H$ (в) и $ASY-D$ (г) для отдельных групп магнитной возмущенности

и $ASY-D$ в каждой группе возмущенности, вариации для 9-й группы не приводятся ввиду небольшого в ней числа дней. Можно заметить, что индексы $SYM-H$, $ASY-H$ и $ASY-D$, в отличие от Dst , испытывают небольшие изменения в течение года — возрастают в летние месяцы по абсолютной величине. Видна также их зависимость от уровня магнитной возмущенности: в возмущенные периоды индексы заметно растут по абсолютной величине и растет амплитуда их годовых вариаций. В относительно спокойные периоды среднегодовые значения Dst , $SYM-H$, $ASY-H$ и $ASY-D$ равны 2.8, 0.8, 14.4 и 13.7 нТл соответственно. Термин «относительно спокойные периоды» применяется в данной работе из-за того, что при суточном усреднении геомагнитных индексов в группах 1 и 2 присутствуют дни с магнитными возмущениями продолжительностью несколько часов.

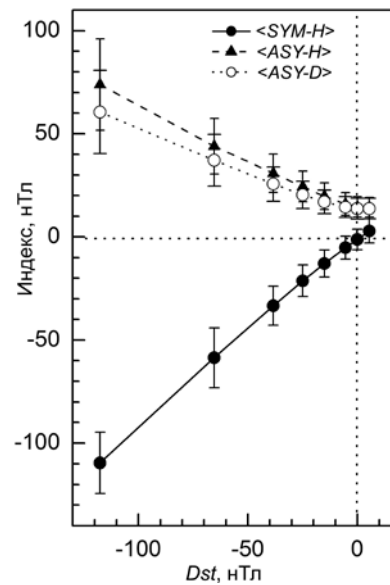


Рис. 2. Изменения среднегодовых значений индексов $SYM-H$, $ASY-H$ и $ASY-D$ в зависимости от средних значений Dst в группах возмущенности и их стандартные отклонения. Пунктирные прямые показывают нулевые значения индексов $SYM-H$, $ASY-H$, $ASY-D$ и Dst

Рисунок 2 показывает изменения среднегодовых значений индексов $SYM-H$, $ASY-H$ и $ASY-D$ как функций от среднегодовых значений Dst отдельно по группам возмущенности. Все среднегодовые индексы проявляют практически линейную зависимость от Dst , причем $SYM-H$ возрастает с ростом Dst почти в два раза сильнее, чем другие. У индексов $ASY-H$ и $ASY-D$ следует отметить одинаковые смещения, равные примерно 13 нТл. Наблюдается отклонение от линейной зависимости, когда $Dst > 0$ и $Dst = 0$. Параметры линейной регрессии между $SYM-H$, $ASY-H$, $ASY-D$ и Dst и величины достоверности линейной аппроксимации R^2 приведены в табл. 2 в строке А (см. ниже в разделе 3). Надо заметить, что R^2 очень высоки. Свободные члены b в уравнениях аппроксимации определяют величины смещений.

На рис. 3 приведены среднесуточные значения $SYM-H$ (а), $ASY-H$ (б) и $ASY-D$ (в) как функции от среднесуточных значений Dst . При построении графиков использованы данные всего периода. Видно, что связи очень тесные, индекс $SYM-H$ по модулю,

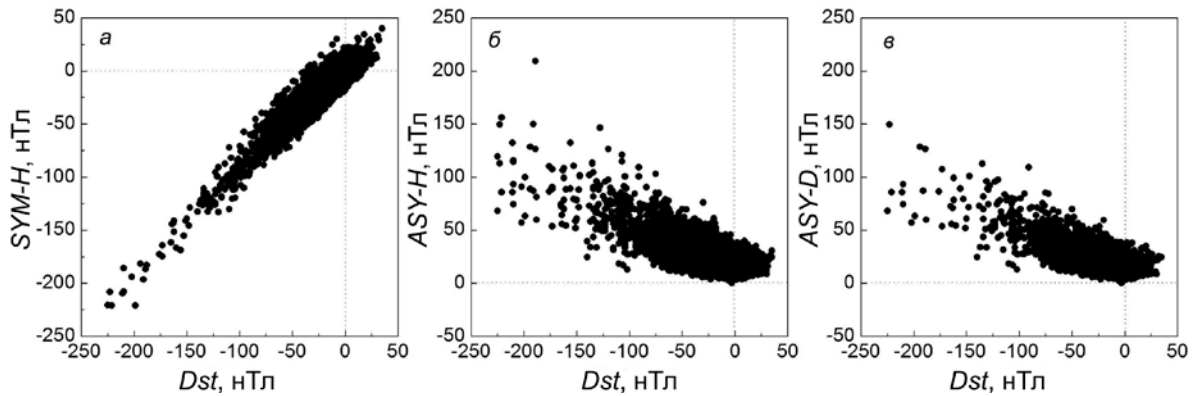


Рис. 3. Корреляционные графики среднесуточных значений индексов *SYM-H* (а), *ASY-H* (б) и *ASY-D* (в) для всего массива данных. Пунктирные линии показывают нулевые значения *Dst*, *SYM-H*, *ASY-H* и *ASY-D*

так же как индексы *ASY-H* и *ASY-D*, растет с ростом модуля *Dst*, что можно интерпретировать как одновременное увеличение симметричной и асимметричной компонент кольцевого тока по мере усиления магнитной возмущенности. Заметно, что симметричная компонента нарастает сильнее, чем асимметричная. Соотношения между индексами можно аппроксимировать уравнениями $SYM-H = 0.86 Dst - 0.60$ с величиной достоверности линейной аппроксимации $R^2 = 0.88$, $ASY-H = -0.43 Dst + 14.40$ с $R^2 = 0.61$ и $ASY-D = -0.3252 Dst + 13.31$ с $R^2 = 0.51$, коэффициенты корреляции между парами индексов равны 0.94, -0.78 и -0.71 соответственно. Были рассмотрены подобные распределения для отрицательных значений *Dst*-индекса, в этом случае зависимости между парами индексов также можно аппроксимировать линейными уравнениями, параметры которых приведены в табл. 2 в строке В.

Заметим, что в случаях индексов *ASY-H* (б) и *ASY-D* (в) на рис. 3, как и на рис. 2, имеются смещения, а уравнения аппроксимации содержат свободные члены: 14.4 нТл в паре *ASY-H* и *Dst* и 13.3 нТл в паре *ASY-D* и *Dst*. Если сопоставить величины этих смещений с полученными по данным рис. 2, то можно увидеть, что они близки.

Подобные графики были построены для каждой группы значений *Dst*. Было получено, что в каждой группе в пределах соответствующих изменений *Dst* все три индекса демонстрируют довольно большие разбросы, однако проявляется тенденция возрастания их модулей линейно с ростом модуля *Dst*. Результаты линейной аппроксимации зависимости трех индексов от *Dst* для каждой группы приведены на рис. 4 в виде распределения коэффициентов регрессии *a* и свободных членов *b* в зависимости от среднего значения индекса *Dst* в группах магнитной возмущенности. Для группы *Dst*=0 в качестве параметра *b* взято среднее для этой выборки значение конкретного индекса (см. табл. 2, строка Г).

На рис. 4 можно видеть, что коэффициент *a* в случае индекса *SYM-H* растет с возрастанием магнитной возмущенности, однако изменяется он в небольшом диапазоне значений от 0.7 до 1.1 и отражает, таким образом, близость индексов *Dst* и *SYM-H* — при сильной возмущенности их среднесуточные значе-

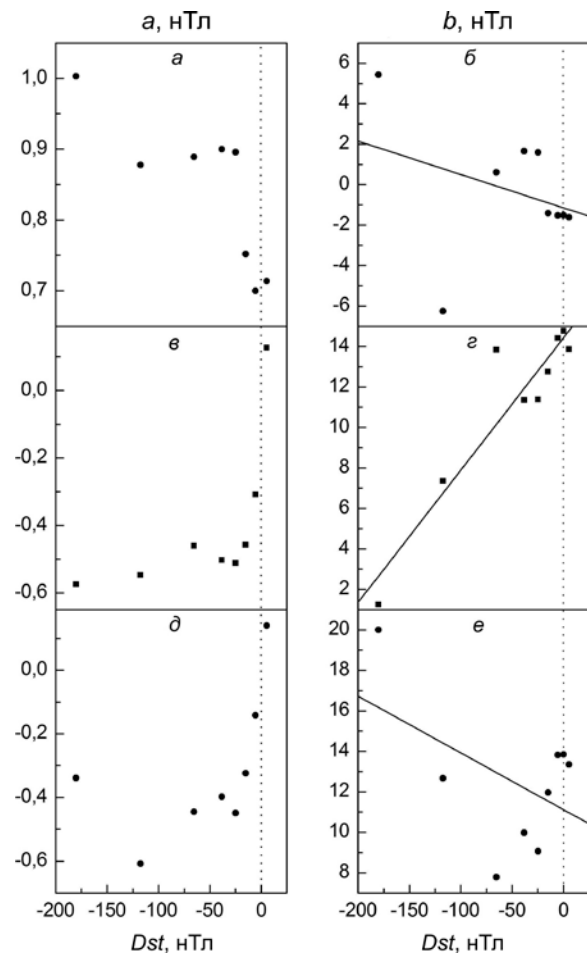


Рис. 4. Распределение коэффициентов регрессии *a* и свободных членов *b* уравнений линейной аппроксимации индексов *SYM-H* (а, б), *ASY-H* (в, г), *ASY-D* (д, е) в зависимости от значений *Dst* в группах возмущенности, прямые сплошные линии — линии аппроксимации для каждого из трех индексов, вертикальные пунктирные линии отмечают *Dst*=0 нТл

ния практически сравниваются. В случаях индексов *ASY-H* и *ASY-D* коэффициент *a* отрицателен, за исключением группы 1 ($0 < Dst$), и изменяется в небольших пределах относительно значений примерно -0.5 и -0.4 соответственно. Это означает, что значения индексов положительны и меньше модуля *Dst* почти в два раза. Достаточно выраженную зависимость от *Dst*

Таблица 2

Коэффициенты регрессии a и свободные члены b в уравнениях аппроксимаций зависимости трех индексов от Dst , а также величины достоверности аппроксимации R^2

	Способ определения смещения	SYM-H			ASY-H			ASY-D		
		a	b , нТл	R^2	a	b , нТл	R^2	a	b , нТл	R^2
А	По среднегодовым значениям индексов в группах Dst (рис. 2)	0.92	0.01	0.998	-0.49	13.61	0.99	-0.39	12.51	0.99
Б	Линейная аппроксимация между индексами и Dst (все дни (рис. 3))	0.86	-0.60	0.88	-0.43	14.40	0.61	-0.33	13.31	0.51
В	Линейная аппроксимация между индексами и Dst (дни для условия $Dst < 0$)	0.89	0.46	0.87	-0.48	12.86	0.62	-0.37	11.76	0.55
Г	Усреднение коэффициентов аппроксимации по всем группам Dst (рис. 4)	0.84	-0.34		-0.41	11.22		-0.32	12.49	
Д	Свободные члены b_2 линейной регрессии зависимости параметров b от Dst (рис. 4)		-1.14			14.43			11.12	
Е	Среднегодовые значения индексов для условий $Dst > 0$ и $Dst = 0$ (рис. 1)		0.8			14.4			13.7	
Ж	Оценочное значение b с учетом медианных и средних значений b , полученных разными способами		-0.1			14			13	

проявляет параметр b для индекса $ASY-H$ (панель z): b с ростом модуля Dst убывает. В случаях $SYM-H$ (панель b) и $ASY-D$ (панель e) параметр b демонстрирует возрастание с ростом возмущенности. Линейный характер зависимости параметров b от индекса Dst можно аппроксимировать уравнением $b = a_2 Dst + b_2$. Свободные члены b_2 полученных уравнений приведены в табл. 2 в строке Д.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Мы определили коэффициенты регрессии и свободные члены в уравнениях линейной аппроксимации и величины смещений для трех индексов шестью путями: по их среднегодовым значениям в группах Dst (см. рис. 2); при рассмотрении регрессии по всем дням (см. рис. 3); при рассмотрении регрессии по дням, когда $Dst < 0$; в виде средних значений b , полученных отдельно по группам возмущенности (рис. 4); как свободные члены в уравнениях регрессии зависимости самих параметров b от Dst (рис. 4); по среднегодовым значениям индексов для условий $Dst > 0$ и $Dst = 0$ (рис. 1). Коэффициенты регрессии и свободные члены в уравнениях аппроксимации зависимости трех индексов от Dst приведены в табл. 2. Рассмотрим поведение свободных членов b (строки Б–Д), а также среднегодовых значений индексов (строки А и Е). В настоящей работе среднегодовые значения индексов для условий $Dst > 0$ и $Dst = 0$ с некоторым допущением можно принять в качестве смещений. Как видно из табл. 2, величины b

для индекса $SYM-H$ малы и варьируют около нуля. Для индексов $ASY-H$ и $ASY-D$ они одного порядка и лежат в диапазоне от 11.1 нТл до 14.4 нТл.

Учитывая медианные и средние значения параметра b , полученных разными способами, можно оценить величины смещений для трех индексов: -0.1 нТл для $SYM-H$, 14 нТл для $ASY-H$ и 13 нТл для $ASY-D$ (табл. 2, строка Ж).

По суточным усреднениям геомагнитных индексов нет возможности определить причины появления смещений. Согласно работе [Weygand, McPherron, 2006], в которой рассматриваются одномоментные значения индексов, смещение значений $SYM-H$, вероятно, вызывается комбинацией вкладов токов Чепмена—Ферраро и кольцевого тока в спокойное время, а также разницей между вкладами токов хвоста магнитосферы в спокойные и буревые дни. Смещение значений $ASY-H$ обусловлено двумя причинами: асимметричным кольцевым током, который всегда присутствует во внутренней магнитосфере, и шумом в данных, вызванным неполным вычитанием вариации спокойного дня на каждой станции. В работе [Jorgensen et al., 2004] получено, что кольцевой ток асимметричен для всех значений Dst и азимутальный пик кольцевого тока расположен в дневном секторе для спокойных условий и около полуночи для возмущенных условий. С использованием динамической модели магнитосферы Земли в работе [Alexeev et al., 1996] определен вклад токовой системы магнитосферного хвоста в изменения Dst в пе-

риоды магнитных возмущений. По данным модельных и экспериментальных исследований суббурь во время геомагнитных бурь, когда Dst было около -80 нТл, в [Turner et al., 2000] установлено, что вклад хвостового тока составляет $22-26$ нТл, а в случае изолированных суббурь получена почти линейная зависимость между Dst и вкладом хвостового тока, который составляет примерно четверть Dst . В работе [Dubyaгин et al., 2014] по данным сравнения модельных магнитосферных расчетов и реальных индексов значительный вклад в $ASY-H$ и $ASY-D$ дают токовые системы, замыкающиеся через ионосферу, — частичный кольцевой ток и области 1 и 2 продольных токов.

Были выявлены также смещения значений индекса Dst . В работе [Mursula, Karinen, 2005] показано, что из-за сезонного изменения магнитного поля на станциях Dst , а также из-за ошибочной обработки кривой спокойного времени при построении индекса в вариациях Dst возникает «не буревая компонента». Авторы [Hakkinen et al., 2003] показали, что средние уровни Dst различаются примерно на 10 нТл из-за того, что станции Dst имеют разные базовые уровни; для устранения вековой вариации ими был предложен новый метод, который позволяет изменить сезонную вариацию индекса Dst примерно на 3 нТл. В модели прогноза Dst [Temerin, Li, 2006] предполагается, что годовая вариация индекса Dst в основном связана с токами магнитопаузы и кольцевыми токами, а также расположением станций магнитометров, используемых для расчета индекса Dst . В работе [Макаров, 2020] показано, что вследствие неравномерности сети станций, участвующих в определении Dst -индекса, образуется годовая вариация Dst .

Рассмотрим такую характеристику, как показатель степени симметрии кольцевого тока [Weygand, McPherron, 2006] — отношение $SYM-H/ASY-H$. На рис. 5 показаны сезонные вариации отношения $SYM-H/ASY-H$ при разных значениях индекса Dst , полученные по среднесуточным значениям индексов. Следует заметить, что когда за сутки усредняются эффекты всех фаз бури, а также эффекты спокойных периодов, показатель симметрии кольцевого тока в большой мере теряет смысл, тем не менее качественные выводы сделать можно.

На рис. 5 можно заметить следующие особенности: во-первых, в периоды, когда индекс $Dst > 0$, отношение $SYM-H/ASY-H$ имеет положительное значение; во-вторых, в периоды, когда $Dst > -20$ нТл, абсолютная величина $SYM-H/ASY-H$ меньше 1; в-третьих, это отношение растет по абсолютной величине по мере возрастания магнитной возмущенности; в-четвертых, при сильных возмущениях (при $Dst < -50$) абсолютная величина отношения превышает 1 и приближается к 2.

Первую особенность можно объяснить тем, что в условиях, когда индекс $Dst > 0$, индекс $SYM-H$ также имеет положительные значения, поскольку является аналогом индекса Dst . Вторая особенность, возможно, отражает полученные при рассмотрении вариаций индекса $ASY-H$ на рис. 1–4 указания на наличие смещения. Третья особенность свидетельствует о посте-

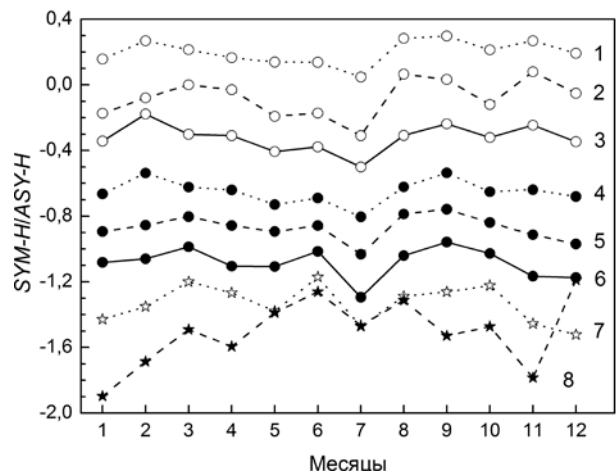


Рис. 5. Поведение в течение года показателя степени симметрии кольцевого тока $SYM-H/ASY-H$. Цифрами обозначены группы магнитной возмущенности

пенном увеличении симметричной компоненты кольцевого тока относительно асимметричной компоненты при возрастании магнитной возмущенности. Четвертая особенность говорит о преобладании в сильно возмущенные периоды симметричной компоненты кольцевого тока. Последние две особенности, вероятно, можно объяснить использованием среднесуточных данных: поскольку фаза восстановления бури значительно продолжительнее (примерно в три и более раза), чем основная фаза, симметричный кольцевой ток сохраняется в течение большего времени и при суточном усреднении дает вклад в геомагнитные изменения, превышающий вклад асимметричной компоненты кольцевого тока во время основной фазы, когда интенсивность этого тока значительно выше. Известно [Weygand, McPherron, 2006], например, что постоянные времена для $SYM-H$ (5.25 и 64.3 ч) почти вдвое больше, чем для $ASY-H$ (2.2 и 20.9 ч).

Предположим, что в относительно спокойные периоды магнитосферные токовые системы, создающие смещение значений индекса $ASY-H$, отсутствуют. Из данных на рис. 2, где представлены среднегодовые значения $ASY-H$, вычтем 13.6 нТл — смещение значений этого индекса (параметр b для индекса $ASY-H$ в табл. 2, строка А). Далее определим отношение $SYM-H/ASY-H$ после учета смещения значений $ASY-H$. На рис. 6 показаны как зависимость от среднего значения Dst отношения $SYM-H/ASY-H$, полученные по среднегодовым значениям индексов, приведенным на рис. 2 (кривая 1), и по тем же данным, но с введением поправки на смещение значений $ASY-H$ (кривая 2).

На рис. 6 видно, что кривая 1 ведет себя так, как описано по данным рис. 5, а кривая 2 — по-другому: во всех группах возмущенности отношения по абсолютной величине больше 1, а в группах 3–8 — даже около 2. Это говорит о том, что в относительно спокойные периоды и при малой возмущенности учет смещения значений $ASY-H$ отражает преобладание симметричной компоненты кольцевого тока над асимметричной. С ростом возмущенности симметричная компонента возрастает в два раза сильнее, чем асимметричная компонента (это можно видеть

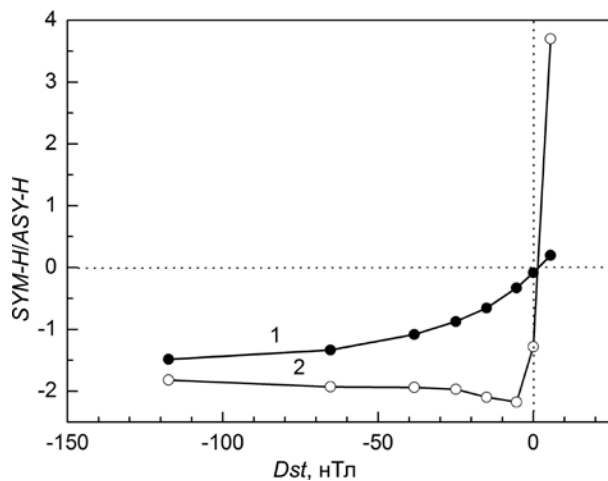


Рис. 6. Зависимость от Dst показателей степени симметрии кольцевого тока $SYM-H/ASY-H$, полученных по среднегодовым значениям индексов в группах магнитной возмущенности (кривая 1) и по тем же данным, но с введением поправки на смещение значений $ASY-H$ (кривая 2). Пунктирные линии отмечают нулевые значения Dst и $SYM-H/ASY-H$

на рис. 2, 3), и это отражается на рис. 6 в виде плато при среднем и большом уровнях возмущенности. Кроме того, такое соотношение индексов подтверждает объяснение третьей и четвертой особенностей, отмеченных при рассмотрении рис. 5: при суточном усреднении из-за того, что фаза восстановления бури значительно продолжительнее, чем основная фаза, симметричная компонента кольцевого тока дает больший вклад в $SYM-H$, чем асимметричная в $ASY-H$.

4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Показано, что среднесуточные значения геомагнитных индексов магнитосферного кольцевого тока $SYM-H$, $ASY-H$ и $ASY-D$ характеризуются сезонными вариациями и зависимостью от уровня магнитной возмущенности — абсолютные значения всех индексов возрастают в летние месяцы и линейно растут с увеличением возмущенности, что можно интерпретировать как одновременное усиление симметричной и асимметричной компонент кольцевого тока в магнитосфере, при этом симметричная компонента возрастает сильнее, чем асимметричная.

2. По данным о сезонных вариациях установлено, что геомагнитные индексы асимметричной компоненты магнитосферного кольцевого тока $ASY-H$ и $ASY-D$ в относительно спокойные периоды не равны нулю: их среднегодовые значения составляют 14.4 и 13.7 нТл соответственно.

3. По результатам регрессионного анализа среднесуточных значений $ASY-H$, $ASY-D$ и Dst установлены величины смещений в зависимостях значений $ASY-H$ и $ASY-D$ от уровня магнитной возмущенности, определяемой индексом Dst : 14.4 нТл для $ASY-H$, 13.3 нТл для $ASY-D$.

4. По данным о среднесуточных значениях $SYM-H$ и $ASY-H$ обнаружено, что показатель степени симметрии кольцевого тока — отношение $SYM-H/ASY-H$ — растет по абсолютной величине по мере возрастания возмущенности и при больших возмущениях (при $Dst < -50$) превышает 1, что можно интерпретиро-

вать как постепенный рост с увеличением возмущенности симметричной компоненты магнитосферного кольцевого тока и ее преобладание над асимметричной компонентой при сильной возмущенности.

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер госрегистрации № АААА-А21-121012000007-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базаржапов А.Д., Матвеев М.И., Мишин В.М. *Геомагнитные вариации и бури*. Новосибирск: Наука, 1979. 248 с.
- 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).
- Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kalegaev V.V., et al. Magnetic storms and magnetotail currents. *J. Geophys. Res.* 1996. Vol. 101, no. A4. P. 7737–7747. DOI: [10.1029/95JA03509](https://doi.org/10.1029/95JA03509).
- Dubyagin S., Ganushkina N., Kubyshkina M., Liemohn M. Contribution from different current systems to SYM and ASY midlatitude indices. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014. Vol. 119. P. 7243–7263. DOI: [10.1002/2014JA020122](https://doi.org/10.1002/2014JA020122).
- Greenspan M.E., Hamilton D.C. A test of the Dessler-Parker-Sckopke relation during magnetic storms. *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105, no. A3. P. 5419–5430. DOI: [10.1029/1999JA000284](https://doi.org/10.1029/1999JA000284).
- Haiducek J.D., Welling D.T., Ganushkina N.Y., et al. SWMF global magnetosphere simulations of January 2005: Geomagnetic indices and cross-polar cap potential. *Space Weather*. 2017. Vol. 15. P. 1567–1587. DOI: [10.1002/2017SW001695](https://doi.org/10.1002/2017SW001695).
- 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. Vol. 108, no. A2. P. 1060. DOI: [10.1029/2002JA009428](https://doi.org/10.1029/2002JA009428).
- Iyemori T., Araki T., Kamei T., Takeda M. Mid-latitude geomagnetic indices ASY and SYM (Provisional) No. 1 (1989–1990). *Internal Report of Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism*. Kyoto University, Japan, 1992.
- Iyemori T., Takeda M., Nose M., et al. Mid-latitude geomagnetic indices “ ASY ” and “ SYM ” for 2009 (Provisional). *Internal Report of Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism*. Kyoto University, Japan, 2010. Available at <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/asy.pdf> (дата обращения 5 октября 2021 г.).
- Jorgensen A.M., Spence H.E., Hughes W.J., Singer H.J. A statistical study of the global structure of the ring current. *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109, A12204. DOI: [10.1029/2003JA010090](https://doi.org/10.1029/2003JA010090).
- Kalegaev V.V., Ganushkina N.Y., Pulkkinen T.I., et al. Relation between the ring current and the tail current during magnetic storms. *Ann. Geophys.* 2005. Vol. 23. P. 523–533. DOI: [10.5194/angeo-23-523-2005](https://doi.org/10.5194/angeo-23-523-2005).
- Maltsev Y.P., Arykov A.A., Belova E.G., et al. Magnetic flux redistribution in the storm time magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1996. Vol. 101, no. A4. P. 7697–7704. DOI: [10.1029/95JA03709](https://doi.org/10.1029/95JA03709).
- 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).
- Shi Y., Zesta E., Lyons L.R., et al. Statistical study of effect of solar wind dynamic pressure enhancements on dawn-to-dusk ring current asymmetry. *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111, A10216. DOI: [10.1029/2005JA011532](https://doi.org/10.1029/2005JA011532).
- Sugiura M., Kamei T. Equatorial Dst index 1957–1986. *IGAGA Bull.* 1991. No. 40. 14 p.
- Temerin M., Li X. Dst model for 1995–2002. *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111, A04221. DOI: [10.1029/2005JA011257](https://doi.org/10.1029/2005JA011257).
- Tsyganenko N.A., Sitnov M.I. Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms. *J.*

Geophys. Res. 2005. Vol. 110, A03208. DOI: [10.1029/2004JA010798](https://doi.org/10.1029/2004JA010798).

Turner N.E., Baker D.N., Pulkkinen T.I., McPherron R.L. Evaluation of the tail current contribution to *Dst*. *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105, no. A3. P. 5431–5439. DOI: [10.1029/1999JA000248](https://doi.org/10.1029/1999JA000248).

Weygand J.M., McPherron R.L. Dependence of ring current asymmetry on storm phase. *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111, A11221. DOI: [10.1029/2006JA011808](https://doi.org/10.1029/2006JA011808).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html> (дата обращения 5 октября 2020 г.).

Как цитировать эту статью:

Макаров Г.А. Смещения значений геомагнитных индексов магнитосферного кольцевого тока. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 3. С. 31–38. DOI: [10.12737/szf-73202103](https://doi.org/10.12737/szf-73202103).