

**СЕВЕРО-ЮЖНАЯ АСИММЕТРИЯ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ
И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА****NORTH-SOUTH ASYMMETRY OF GEOMAGNETIC ACTIVITY
AND SOLAR WIND ELECTRIC FIELD****Г.А. Макаров***Институт космических исследований и аэронавтики
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, gmakarov@ikfia.sbras.ru***G.A. Makarov***Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aero-
nomy of SB RAS,
Yakutsk, Russia, gmakarov@ikfia.sbras.ru*

Аннотация. Исследуется асимметрия геомагнитной активности в Северном и Южном полушариях. Показано, что асимметрия тем больше, чем выше уровень магнитной активности. Обнаружено, что асимметрия полушарий проявляется в компоненте 06–18 GMT суточной вариации магнитной активности, а в компоненте 00–12 GMT асимметрия отсутствует полностью. Предполагается, что причиной северо-южной асимметрии являются меридиональные токи Педерсена, текущие между высокими и средними широтами в ионосфере. Предложена качественная модель образования асимметрии, связанная с электрическим полем солнечного ветра.

Ключевые слова: геомагнитная активность, магнитосфера Земли, межпланетное магнитное поле.

Abstract. Geomagnetic activity asymmetry in the northern and southern hemispheres is studied. It is shown, that the higher is the level of magnetic activity the greater is asymmetry. It is found, that the asymmetry of hemispheres shows itself in the 06–18-hourly component of magnetic activity daily variation, while the asymmetry in the 00–12-hourly component is completely absent. The cause of geomagnetic north-south asymmetry is supposed to be Pedersen meridional current between high and low latitudes in the ionosphere. The qualitative model of formation of asymmetry connected with the solar wind electric field is proposed.

Keywords: Geomagnetic activity, the Earth's magnetosphere, interplanetary magnetic field.

ВВЕДЕНИЕ

Известно [Siebert, 1968; Wilcox, 1968], что геомагнитная активность в положительном секторе межпланетного магнитного поля (ММП) в Северном полушарии выше, чем в Южном, а в отрицательном секторе ММП, наоборот, активность выше в Южном полушарии. В отмеченных работах анализируются геомагнитные трехчасовые данные [Siebert, 1968] или суточные вариации в отдельные периоды [Wilcox, 1968]. Однако в них не рассматривалось влияние уровня магнитной активности на величину асимметрии.

Для выяснения физической природы северо-южной асимметрии магнитной активности необходимо рассмотреть ее по всему массиву данных и в периоды с различной магнитной активностью.

Анализовались трехчасовые данные геомагнитных индексов a_n и a_s за 1968–1975 гг. и их среднесуточные значения A_n и A_s [Geomagnetic Data, 1972–1976]. Весь массив данных разделялся на два класса по знаку секторной структуры ММП от Солнца (положительный сектор) и к Солнцу (отрицательный сектор). В каждый класс входили четыре группы в зависимости от уровня магнитной активности. Первую группу составили дни, имеющие суточную сумму ΣK_p , равную $0 \div 12$ баллам, вторую — $13 \div 18$, третью — $19 \div 23$, четвертую — $24 \div 33$. Обработка данных проводилась методом наложенных эпох. В результате по каждой группе получены трехчасовые данные и их месячные значения.

**ГОДОВЫЕ
И СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ**

В работе [Данилов, 1998] показано, что превышение магнитной активности в положительном секторе ММП в Северном полушарии равно превышению активности в отрицательном секторе ММП в Южном полушарии. Для выделения асимметрии применим следующую комбинацию геомагнитных индексов A_n и A_s Северного и Южного полушарий соответственно. В качестве активного варианта A образуем сумму среднесуточных значений $A = (A_n^+ + A_s^-)$, где знаки «+» и «-» относятся к положительному и отрицательному секторам ММП. Для сравнения образуем контрольный вариант $K = (A_n^- + A_s^+)$. Результаты для четырех групп ΣK_p представлены на рис. 1. Видно, что кривые в активном варианте A расположены выше, чем в контрольном варианте K . При этом различие между A и K увеличивается с ростом магнитной активности. В спокойные периоды ($\Sigma K_p = 0 \div 12$) различие между A и K практически исчезает.

Рассмотрим изменения a_n и a_s по времени суток. Для этого по данным трехчасовых a_n и a_s был проведен гармонический анализ Фурье и определены амплитуда R и время T максимума суточной вариации. В качестве времени T принято солнечное время Северного геомагнитного полюса GMT, отличающееся от гринвичского времени UT на 4.5 ч ($GMT = UT - 4.5$). В солнечно-эклиптической системе координат вектор

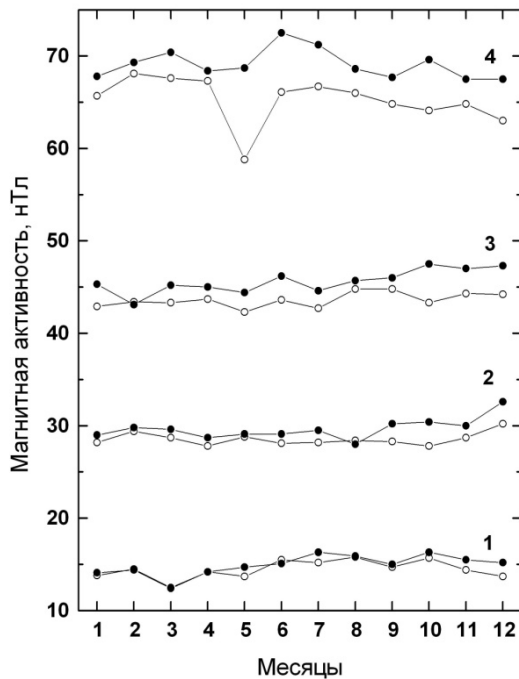


Рис. 1. Годовой ход магнитной активности для активного (●—●) и контрольного (○—○) вариантов. Активный вариант соответствует сумме $(A_n^+ + A_s^+)$, контрольный вариант — $(A_n^- + A_s^+)$, где индексы обозначают Северное (n) и Южное (s) полушария и полярность секторов ММП. Цифрами обозначены уровни магнитной активности: 1 — $\Sigma K_p = 0 \div 12$; 2 — $13 \div 18$; 3 — $19 \div 23$; 4 — $24 \div 33$

с амплитудой R с фазой максимума T (выраженной в градусах) можно разложить на две компоненты $a_x = R \cos T$ и $a_y = R \sin T$, направленные по геомагнитному меридиану и параллели соответственно. Если причиной геомагнитной активности являются ионосферные токи, очевидно, что a_x -компонента обусловлена токами, текущими по геомагнитным параллелям, а a_y -компонента — токами, текущими по меридиану. По компонентам a_x и a_y образуем комбинации A и K . Результаты представлены на рис. 2. Отметим, что в случае a_y приняты абсолютные значения, так как эта компонента имеет противоположные знаки в положительном и отрицательном секторах ММП.

Видно, что в случае a_x варианты A и K практически не отличаются, а в случае a_y кривые варианта A расположены значительно выше, чем для контрольного варианта K . Это означает, что северо-южная асимметрия магнитной активности связана с ионосферными токами, текущими вдоль меридиана.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЭФФЕКТА

Авторы работ [Siebert, 1968] и [Wilcox, 1968] считают, что полушария Земли более восприимчивы к магнитным возмущениям, когда хвостовое поле магнитосферы Земли имеет противоположное направление относительно ММП и может произойти пересоединение полей. Эта идея вызывает два замечания. Во-первых, в долях хвоста поле имеет только B_x -компоненту. Следовательно, пересоединение может произойти только с B_x -компонентой ММП. Однако в работах [Шеломенцев, 1977] и [Yoshizawa,

1986] показано, что северо-южная асимметрия магнитной активности связана с азимутальной B_y -компонентой ММП. Автор работы [Petrukovich, 2011] по данным ИСЗ Geotail показал, что B_y -компонента ММП существенно влияет на B_z -компоненту магнитного поля в плазменном слое, которая зависит от угла наклона геодиполя. В работе [Cao et al., 2014] на базе измерений Cluster этот результат был подтвержден. Следовательно, идея пересоединения полей в радиальном направлении не может быть принята для объяснения асимметрии. Во-вторых, если допустить, что хвостовое поле магнитосферы Земли и ММП все-таки пересоединяются, остается неясным, как передать энергию пересоединения в средние широты, так как доли хвоста связаны силовыми линиями с полярной шапкой.

Автор работы [Шеломенцев, 1977] считает, что в периоды (+) ММП авроральная утренняя электроструя возрастает, а возвратные токи в Северном полушарии смещаются к экватору, а в Южном полушарии — к полюсу. Сделан вывод, что возвратные холловские токи утренней электроструи являются причиной северо-южной асимметрии. Это неверно, поскольку эти токи текут в основном по параллелям, а их магнитный эффект должен проявляться в a_x -компоненте. Из рис. 2 видно, что в этой компоненте асимметрия полушарий не проявляется совсем. Согласно данным рис. 2, асимметрия проявляется в a_y -компоненте суточной вариации, т. е. связана с меридиональными токами.

В работе [Yoshizawa, 1986] отмечено, что на величину асимметрии влияет суббуревая активность. Там же получено, что величина асимметрии зависит от магнитного местного времени. Магнитная и суббуревая активности — не тождественные понятия. В отличие от суббуревой магнитная активность не обязательно изменяется в результате накопления энергии в хвосте магнитосферы.

Мы предлагаем следующую качественную схему образования северо-южной асимметрии магнитной активности. ММП проникает в доли хвоста магнитосферы и генерирует электрическое поле $\mathbf{E} = -[\mathbf{V} \times \mathbf{B}]$, где \mathbf{V} — скорость солнечного ветра, \mathbf{B} — магнитное поле хвоста, направленное к Земле в северной доле хвоста и от Земли в южной. В долях хвоста происходит электрический дрейф плазмы (рис. 3). Видно, что в активном варианте скорость дрейфа \mathbf{V}_A направлена с утренней стороны хвоста на вечернюю, а в контрольном варианте — с вечера на утро. На высотах ионосферы дрейфу подвержены только электроны, а протоны остаются на месте из-за частых соударений с нейтралами. Следовательно, в полярной ионосфере генерируются токи, текущие с вечера на утро. Это согласуется с известным фактом [Ионосферно-магнитные возмущения ..., 1986], что в положительном секторе ММП в Северном полушарии вечерний вихрь конвекции расширяется на большую часть полярной шапки, что эквивалентно появлению электрического тока поперек полярной шапки.

В активном варианте положительные заряды скапливаются на утренней стороне полярной ионосферы, а отрицательные заряды — на вечерней. Эти дрейфовые заряды усиливают существующее электри-

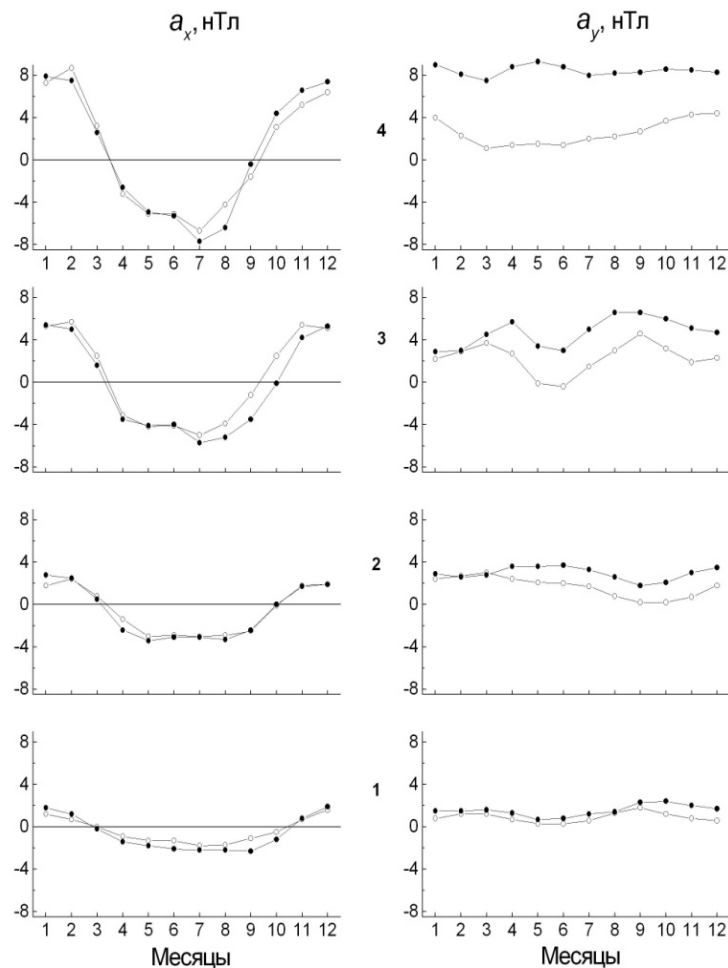


Рис. 2. Годовой ход $0 \div 12$ часовых (a_x) и $6 \div 18$ часовых (a_y) компонент суточной вариации магнитной активности для активного ($\bullet-\bullet$) и контрольного ($\circ-\circ$) вариантов. Цифрами обозначены уровни магнитной активности: 1 — $\Sigma K_p=0 \div 12$; 2 — $13 \div 18$; 3 — $19 \div 23$; 4 — $24 \div 33$

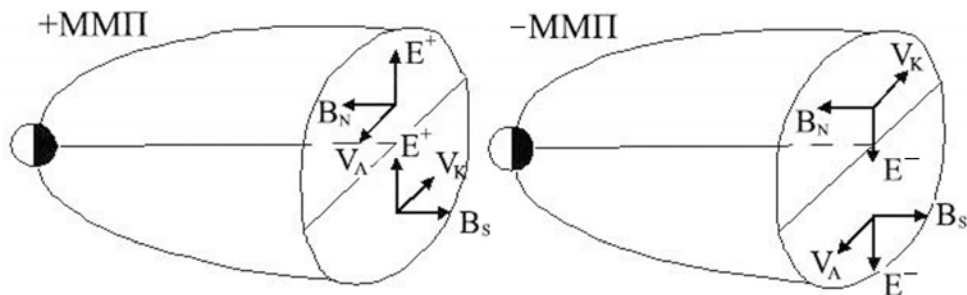


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая электрический дрейф плазмы в долях хвоста магнитосферы в положительном (+) и отрицательном (-) секторах ММП. \mathbf{B}_N и \mathbf{B}_S — магнитное поле в северной и южной долях хвоста, \mathbf{E}^+ и \mathbf{E}^- — электрическое поле солнечного ветра, \mathbf{V}_A и \mathbf{V}_K — скорость дрейфа плазмы в долях хвоста для активного A и контрольного K вариантов магнитной активности

ческое поле \mathbf{E} , связанное с продольными магнитосферными токами зоны 1 [Iijima, Potemra, 1976]. В контрольном варианте дрейф происходит с вечера на утро, и дрейфовые заряды ослабляют поле, образованное токами зоны 1. В активном варианте создается дополнительное электрическое поле между высокими и средними широтами. В этом поле развиваются дополнительные токи Педерсена, текущие от высоких широт в средние в утреннем секторе ионосферы и в обратном направлении в вечернем. До-

полнительные токи Педерсена в сочетании с существующими токами в полярной ионосфере замыкают втекающие токи зоны 1 и вытекающие токи зоны 2, которые существуют, по-видимому, во всей области от средних широт до авроральной зоны. Таким образом, в случае положительного сектора ММП в Северном полушарии развивается дополнительная токовая система, состоящая из продольных токов зон 1 и 2, дрейфовых и педерсеновских токов в полярной и среднширотной ионосферах. В периоды

отрицательного ММП токовая система развивается в Южном полушарии. Для контрольного варианта эта токовая система не развивается, так как она прерывается в полярной шапке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы сводятся к следующему.

1. На большом экспериментальном материале подтвержден вывод о том, что в положительном секторе ММП геомагнитная активность в Северном полушарии выше, чем в Южном, а в отрицательном секторе активность выше в Южном полушарии. Получено дополнительно, что асимметрия полушарий тем больше, чем выше уровень магнитной активности. В спокойные периоды асимметрии нет.

2. Асимметрия полушарий проявляется в a_y -компоненте суточной вариации магнитной активности, а в a_x -компоненте асимметрия отсутствует полностью.

3. Непосредственной причиной северо-южной асимметрии являются, вероятно, меридиональные токи Педерсена, текущие между высокими и средними широтами в ионосфере.

4. Предложена качественная модель образования асимметрии. Электрическое поле солнечного ветра $\mathbf{E} = -[\mathbf{V} \times \mathbf{B}]$ проникает в доли хвоста магнитосферы и создает здесь электрический дрейф плазмы. На высотах ионосферы этот дрейф усиливает электрическое поле поперек полярной шапки и генерирует дополнительное электрическое поле между высокими и средними широтами. В этом поле образуются токи Педерсена, ответственные за наблюдаемую асимметрию магнитной активности в двух полушариях.

Настоящая работа была начата совместно с А.А. Даниловым, ушедшим из жизни 24.12.2011 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Данилов А.А. Северо-южная асимметрия геомагнитной активности // Геомагнетизм и аэронаука. 1998. Т. 38, № 3. С. 39–46.

Ионосферно-магнитные возмущения в высоких широтах / Под ред. О.А. Трошичева. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 256 с.

Шеломенцев В.В. Связь северо-южной асимметрии геомагнитной активности с y -компонентой ММП // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. М.: Наука, 1977. Вып. 43. С. 55–59.

Cao J.B., Duan A., Dunlop M., Wei X., Cai C. Dependence of IMF B_y penetration into the neutral sheet on IMF B_z and geomagnetic activity // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119. P. 5279–5285. DOI: 10.1002/2014JA019827.

Geomagnetic Data. IAGA Bulletin 1972–1976. N 32, a–h.

Iijima T., Potemra T.A. The amplitude distribution of field-aligned currents of northern high latitudes observed by Triad // *J. Geophys. Res.* 1976. V. 81. P. 2165–2174.

Petrukovich A.A. Origins of plasma sheet B_y // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116, A07217. DOI: 10.1029/2010JA016386.

Siebert M. Magnetic activity differences between the two hemispheres following the sector structure of the interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res.* 1968. V. 73. P. 3049–3052.

Wilcox J.M. Asymmetry in the geomagnetic response to the polarity of the interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res.* 1968. V. 73. P. 6835–6836.

Yoshizawa K. Effect of the IMF- B_y component on the North-South asymmetry of geomagnetic activity // *Planetary and Space Science.* 1986. V. 34. P. 639–644. DOI: 10.1016/0032-0633(86)90041-3.

REFERENCES

Cao J.B., Duan A., Dunlop M., Wei X., Cai C. Dependence of IMF B_y penetration into the neutral sheet on IMF B_z and geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.* 2014, vol. 119, pp. 5279–5285. DOI: 10.1002/2014JA019827.

Danilov A.A. North-south asymmetry of geomagnetic activity. *Geomagnetizm i Aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1998, vol. 38, no. 3, pp. 39–46 (in Russian).

Geomagnetic Data. IAGA Bulletin 1972–1976, no. 32, a–h.

Iijima T., Potemra T.A. The amplitude distribution of field-aligned currents of northern high latitudes observed by Triad. *J. Geophys. Res.* 1976, vol. 81, pp. 2165–2174.

Ionospheric-magnetic disturbances at high latitudes / Ed. O.A. Troshichev. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1986. 256 p. (in Russian).

Petrukovich, A.A. Origins of plasma sheet B_y . *J. Geophys. Res.* 2011, vol. 116, A07217. DOI: 10.1029/2010JA016386.

Shelomentsev V.V. Correlation between the north-south asymmetry and IMF y -component. *Issledovaniya po Geomagnetizmu, Aeronomii i fizike Solntsa* [Research on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics]. Moscow, Nauka Publ., 1977, iss. 43, pp. 55–59 (in Russian).

Siebert M. Magnetic activity differences between the two hemispheres following the sector structure of the interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.* 1968, vol. 73, pp. 3049–3052.

Wilcox J.M. Asymmetry in the geomagnetic response to the polarity of the interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.* 1968, vol. 73, pp. 6835–6836.

Yoshizawa K. Effect of the IMF- B_y component on the North-South asymmetry of geomagnetic activity. *Planetary and Space Sci.* 1986, vol. 34, pp. 639–644. DOI: 10.1016/0032-0633(86)90041-3.