

УДК 550.385

ОЦЕНКИ СЕЗОННЫХ ВАРИАЦИЙ МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

Н.М. Руднева¹, Е.А. Гинзбург¹, Л.А. Дремухина², А.А. Нусинов¹

Поступила в редакцию 24.11.2015 г.

Проанализированы частотные распределения суточных и часовых индексов магнитной активности, а также часовых значений геоэффективных параметров солнечного ветра, по сезонам года. Получено подтверждение равноденственного и летнего максимумов магнитной активности, показана их статистическая значимость. Приведены аргументы, подтверждающие «осевой» и «равноденственный» механизмы обеспечения равноденственных максимумов. Высказано предположение, что летний максимум может возникать в результате существования на Солнце активных кэррингтоновских долгот.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИНДЕКСЫ МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ, ПАРАМЕТРЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА, ЧАСТОТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ, ВЫБРОС КОРОНАЛЬНОЙ МАССЫ, СЕЗОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ

ВВЕДЕНИЕ

Существование равноденственных максимумов магнитной активности замечено очень давно [1, 2]. Среднемесячные значения индексов магнитной активности, полученные при усреднении за длительный промежуток времени, имеют более высокие значения в период равноденствий. Считалось, что повышение магнитной активности в равноденствие вызвано более частыми появлениями сильных магнитных бурь [3, 4]. Однако последние статистические исследования [5] показали, что, хотя равноденственные максимумы выражены более отчетливо для сильных бурь, умеренные и слабые бури также имеют тенденцию более часто наблюдаться в сезоны равноденствия. Равноденственные максимумы магнитной активности первоначально пытались объяснить максимальной широтой гелиопроекции Земли в равноденствие, что способствует более вероятному достижению Земли солнечными потоками от активных областей («осевая» гипотеза) [1, 2]. Попытки объяснить сезонные вариации магнитной активности учетом ориентации оси геомагнитного диполя относительно плоскости эклиптики условно относят к «равноденственным» гипотезам [6, 7]. В [7] большая часть сезонной вариации объясняется зависимостью от сезона угла между земным диполем и направлением скорости солнечного вектора. Авторы [8] предлагают объяснять сезонный ход магнитной активности зависимостью неустойчивости Кельвина-Гельгольца на флангах магнитосферы от сезона года. В [3] предложено объяснение полугодовых вариаций магнитной активности модуляцией V_z -составляющей межпланетного магнитного поля (ММП) в солнечно-магнитосферной системе координат (GSM) в периоды равноденствия. Согласно [9] существует широтный эффект полугодовых вариаций магнитной активности: абсолютное значение сезонной вариации не меняется с широтой, а относительное значение достаточно резко уменьшается при возрастании широты. В авроральной зоне сезонные изменения претерпевает только AL -индекс, связанный с суббуревой активностью. Сезонные вариации характеристик геомагнитных суббурь и индекса магнитной активности Ar изучались также в работе [10], в которой было отмечено, что амплитуда суббурь и индекс Ar имеют равноденственные максимумы. При этом в 22 цикле солнечной активности преобладал весенний максимум, а в 23 цикле осенний. Причиной равноденственных максимумов в [10] предполагается асимметрия солнечного ветра и магнитного поля в полусферах Солнца. При этом авторы считают значения равноденственных максимумов завышенными и считают необходимым провести дополнительный анализ.

Таким образом, несмотря на более чем вековое изучение сезонного хода геомагнитной активности, абсолютной ясности в этом вопросе не достигнуто. Что касается летнего максимума, то его обсуждение в литературе отсутствует. Однако о возможном существовании летнего максимума магнитной активности упоминается в [5].

1 Руднева Нэлли Михайловна, старший научный сотрудник, ФГБУ «ИПГ», (499)187-25-83 E-mail: r39@mail.ru

1 Гинзбург Евгений Абрамович, главный научный сотрудник, ФГБУ «ИПГ», (499)187-61-16, E-mail: E_Ginzburg@mail.ru

2 Дремухина Лидия Алексеевна, старший научный сотрудник, «ИЗМИРАН», (495)851-02-86, E-mail: Dremukh@izmiran.ru

1 Нусинов Анатолий Абрамович, зав. лабораторией, ФГБУ «ИПГ», (499)187-25-83, E-mail: nusinov@mail.ru

В данной работе проведён статистический анализ значений индексов магнитной активности и геоэффективных параметров солнечного ветра с целью получения их годового хода и аргументов в пользу той или иной гипотезы, объясняющей сезонный ход вариаций. Используется большой объем данных, взятых в интернете [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>]. Применяются несколько отличные от ранее используемых подходы к изучению сезонных вариаций магнитной активности. Основное внимание уделено изучению характеристик сезонных распределений суточных и часовых индексов магнитной активности и часовых значений геоэффективных параметров солнечного ветра. В качестве геоэффективных параметров рассматривались значения скорости солнечного ветра V и число Vz -событий в солнечном ветре.

Vz -событием в солнечном ветре в данной работе названо зарегистрированное на космических аппаратах вблизи передней точки либрации наблюдение среднечасовых значений $|Vz|$ ММП ≥ 5 нТл в течение интервала времени $\tau \geq 4$ часов. Понятие Vz -события в солнечном ветре было введено в связи с известным положением [4], согласно которому для начала развития кольцевого тока в магнитосфере, соответствующего понижению индекса Dst , необходимо, чтобы вертикальная составляющая ММП сохранила значение $Vz < -5$ нТл не менее 3 часов.

Распределения суточных значений индекса A_p получены для периода с 1932 по 2011 годы. Расчет вероятностных распределений значений трёхчасовых значений a_p и часовых значений Dst был проведен для временного периода длительностью 46 лет с января 1964 г. по декабрь 2009 г. Для расчета распределений Vz -событий был выбран период 1995–2009 гг., соответствующий минимальному количеству пропусков наблюдений в солнечном ветре. Этот период содержит один максимум и два минимума солнечной активности. Поскольку скорость солнечного ветра зависит от фазы цикла солнечной активности, функция распределения скорости солнечного ветра рассматривалась отдельно для периодов максимума и минимума солнечной активности 1998–2003 гг.

ЧАСТОТНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ A_p – ИНДЕКСОВ МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ ПО СЕЗОНАМ ГОДА

Предварительно были построены гистограммы A_p -индекса для двух способов разделения временного интервала по сезонам года. Первым способом сезоны определялись по месяцам: лето — май–август; зима — ноябрь, декабрь и январь, февраль; равноденствие — март, апрель, сентябрь, октябрь. При использовании второго способа равноденствие соответствовало периоду, отстоящему от дня равноденствия вперед и назад на 81 день, а промежуточные между равноденствиями периоды отнесены к лету и зиме. Оказалось, что гистограммы для сезонных выборок, определенных двумя способами, отличаются незначительно, а статистики распределений практически идентичны. В дальнейшем мы будем пользоваться выборками сезонов по месяцам.

На рисунке 1 приведены кумулятивные кривые (эмпирические функции распределения) [11, 12] A_p -индекса для трех сезонов года. В таблице ниже приведены статистики распределений индекса A_p для трех сезонов года.

Таблица

Статистики сезонных распределений индекса A_p

Сезон/Число значений	Зима	Лето	Равноденствие
	9680	9901	9821
Минимум	0	0	0
Максимум	280	236	280
Среднее	12.64	13.1	16.29
Медиана	9	8	11
Стандартная ошибка среднего	0.1317	0.1535	0.1884

Для кумулятивных кривых проверялись гипотезы о совпадении распределений в сезонах по непараметрическому критерию Н.В. Смирнова [12]:

$$U = \left(\frac{n_1 \cdot n_2}{(n_1 + n_2)} \right)^{0.5} \max |F_1(x) - F_2(x)|$$

где n_1 и n_2 — количество наблюдений в каждой из выборок, F_1 и F_2 — соответствующие функции распределения.

Оказалось, что распределения значений A_p для равноденствия и зимы, для равноденствия и лета различаются с доверительной вероятностью > 0.95 . Для сезонов зима–лето распределения различаются с доверительной вероятностью ~ 0.7 . Явное различие между функциями распределения A_p для равноденствия и лета–зимы видно для значений $A_p > 30$ нТл, в то время как для значений $A_p > 60$ нТл между функциями распределения для зимы и лета это различие небольшое.

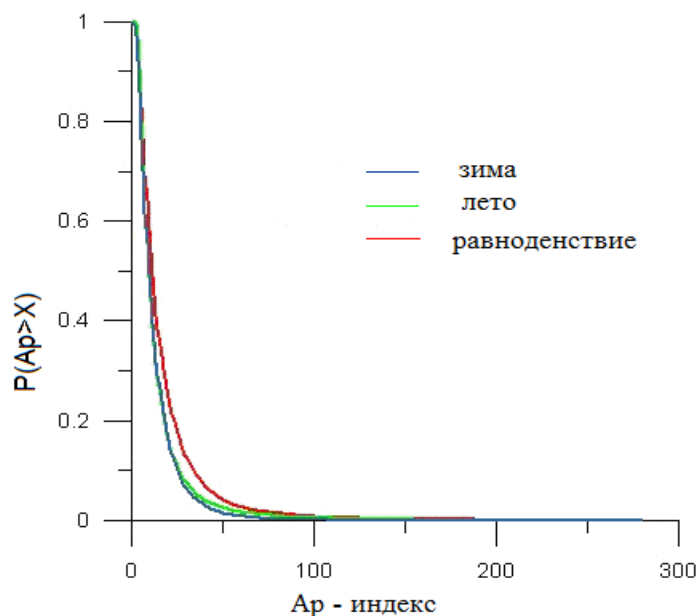


Рис.1. Кумулятивные кривые для A_p -индекса (накопление вероятностей начинается с больших значений A_p [11])

ЧАСТОТНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЁХЧАСОВЫХ ИНДЕКСОВ a_p И ЧАСОВЫХ ИНДЕКСОВ D_{ST} МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

Для периода 1964–2009 гг. были рассчитаны гистограммы частотных распределений и кумулятивные кривые для индексов магнитной активности a_p и D_{ST} для трёх сезонов года. Накопление вероятностей начинается с больших значений a_p и с больших отрицательных значений D_{ST} . Накопленные вероятности представлены на гистограммах в логарифмическом масштабе для более чёткого отражения малых значений вероятностей, которые как раз и присущи самым интересным и важным событиям высокой магнитной активности. На рисунках 2 и 3 представлены гистограммы значений индексов a_p и D_{ST} , а на рис. 4 кумулятивные кривые для этих индексов.

Статистическая проверка различий распределений a_p зимой и летом, зимой и в равноденствие по критерию Н.В. Смирнова [12] показала, что распределения отличаются с доверительной вероятностью 0.97. Из рисунков видно, что значения индексов $a_p < \approx 40$ нТл и $D_{ST} < \approx -50$ нТл более часто наблюдаются в равноденственные сезоны. Значение $a_p = 100$ нТл в равноденствие имеет перцентильный ранг ~ 1 (т.е. значения $a_p \geq 100$ нТл составляют 1% всех наблюдений a_p), зимой и летом ранг значения $a_p = 100$ нТл меньше (зимой примерно на 0,3%). Значения $a_p > 300$ нТл имеют очень маленький перцентильный ранг (вероятность таких высоких значений равна 0,1 процента и менее). Для индекса D_{ST} вероятность появления больших отрицательных значений также больше в равноденствие. Однако летом D_{ST} -индекс имеет максимум не отрицательных, а положительных значений (см. гистограмму).

Это можно объяснить тем, что летом наблюдались потоки солнечного ветра с более высокими кинетическими энергиями, что могло привести к частичной компенсации геомагнитного эффекта кольцевого тока ($D_{ST} < 0$) эффектом сжатия магнитосферы и усилением токов на магнитопаузе ($D_{ST} > 0$).

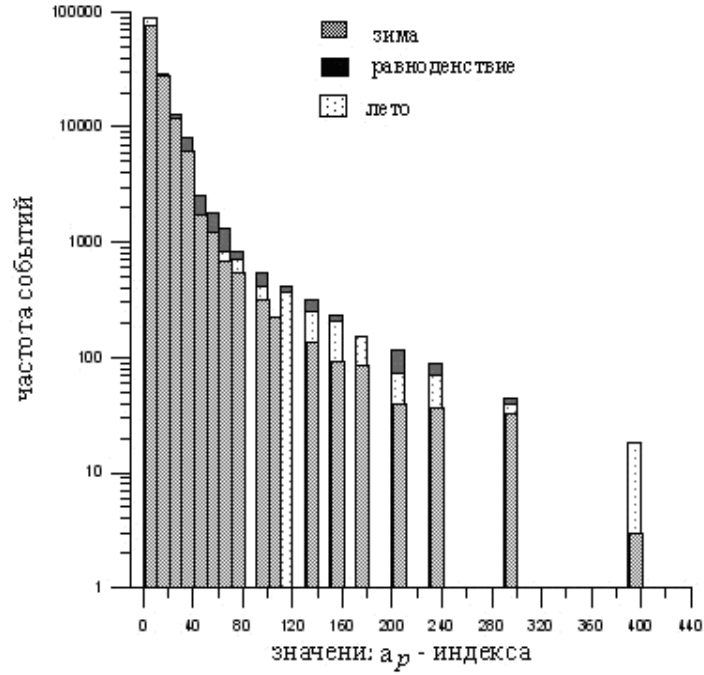


Рис.2. Гистограмма индекса a_p для трех сезонов (период 1964- 2009 гг.)

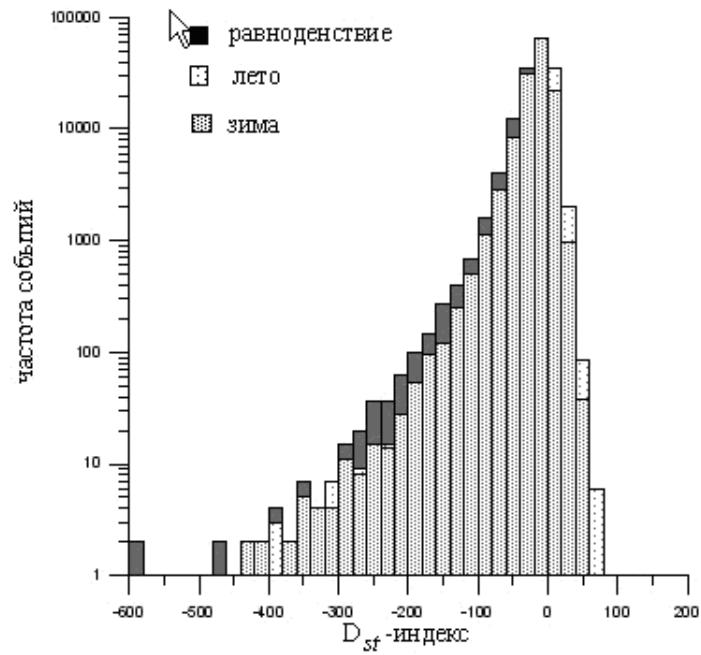


Рис.3. Гистограмма индекса D_{st} , для трех сезонов (1964-2009 гг.)

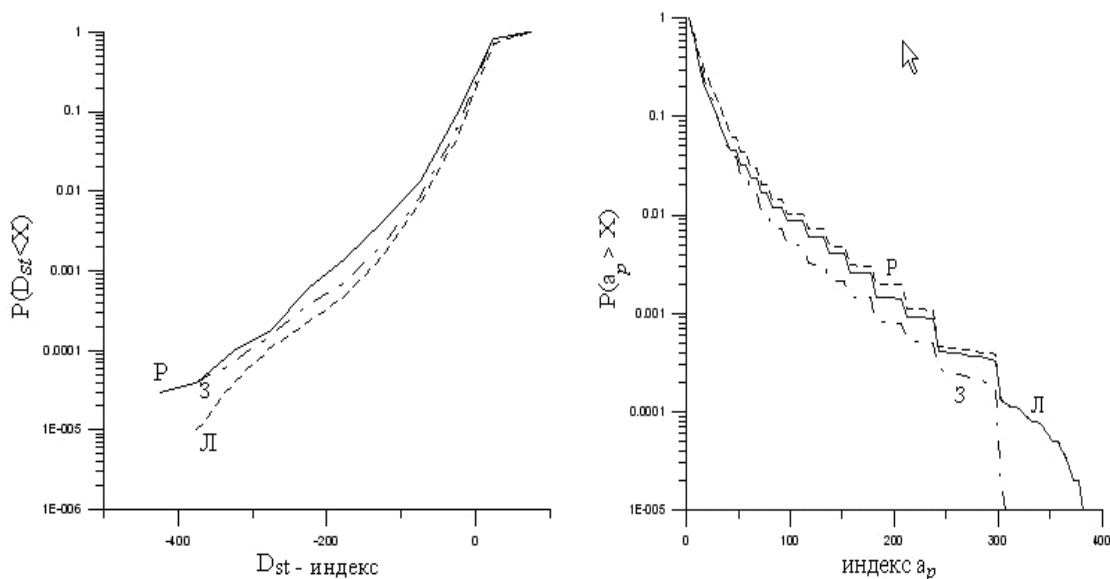


Рис. 4. Кумулятивные кривые для Dst - и a_p -индексов, рассчитанные для трёх сезонов в логарифмическом масштабе. З — зима, Л — лето, Р — равноденствие (1964–2009) гг.)

Таким образом, частотные распределения a_p индексов магнитной активности, полученные на большом экспериментальном материале (1964–2009 гг., охватывающие циклы солнечной активности 20–23), подтверждают наличие равноденственного и летнего максимумов магнитной активности с большой вероятностью статистической значимости. Что касается Dst-индекса, то можно говорить о наличии равноденственного максимума для отрицательных значений и летнего максимума для положительных значений. Наиболее отчётливо равноденственный и летний максимумы проявляются для больших значений индексов, соответствующих сильным геомагнитным возмущениям.

ЧАСТОТНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ СКОРОСТИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА, V_z – СОБЫТИЙ И КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ ДЛЯ СЕЗОНОВ ГОДА

Известно, что наиболее геоэффективными параметрами солнечного ветра являются отрицательная V_z -составляющая ММП и скорость солнечного ветра [4, 13]. Анализ сезонных изменений этих параметров может способствовать пониманию физических причин годовых вариаций магнитной активности. На рисунке 5 приведена эмпирическая функция распределения значений скорости солнечного ветра V для периода вблизи максимума солнечной активности 23 цикла (1998–2003гг.). Для периодов минимума солнечной активности существенных различий в распределениях значений скорости по сезонам не обнаружено.

Как можно видеть из рис.5, значения скорости солнечного ветра $400 < V < 500$ км /с несколько чаще отмечаются в равноденствие, чем зимой, а летом наиболее вероятны скорости $V > 400$ км/ с. Таким образом, существует небольшой равноденственный и преобладающий летний максимумы значений скорости солнечного ветра в период 1998–2003 гг. Полученный результат согласуется с выводами работы [10]. Авторы [10] отмечали повышение скорости солнечного ветра и межпланетного магнитного поля в сезоны равноденствия на фазе спада солнечной активности в 23 цикле.

На рисунке 6 приведены распределения V_z -событий по месяцам года в двух системах координат для временного интервала 1995–2008 гг. и числа корональных выбросов, наблюдаемых вблизи Земли в период 1995–2002 гг. Корональные выбросы, наблюдаемые в солнечном ветре вблизи Земли (IGME), определены в [14].

Для данных на рис.6 были определены средние значения событий в месяце и отклонения от среднего с доверительной вероятностью 95%. Средние значения частоты V_z -событий в месяц для систем координат GSE и GSM составляют, соответственно, 25.7 ± 1.7 и 30.7 ± 1.4 , а среднее значение IGME в месяц равно 17.7 ± 3.3 . Превышают среднее значение на величину, большую стандартного отклонения, и

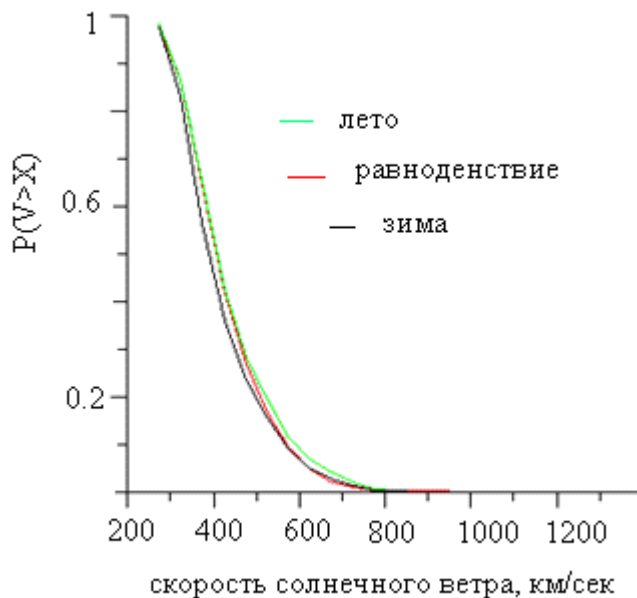


Рис.5. Эмпирические функции распределения скорости солнечного ветра для трех сезонов года (период 1998-2003 гг.)

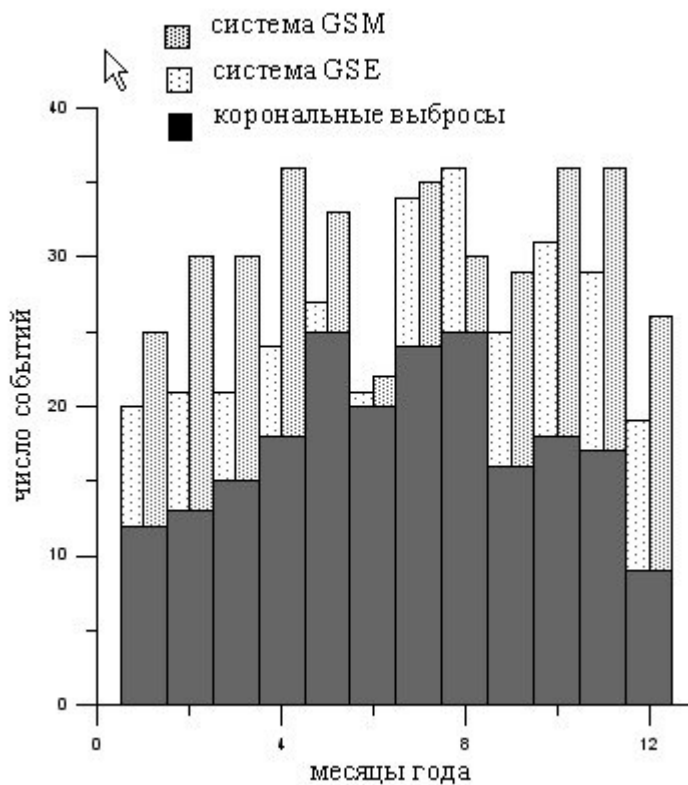


Рис. 6. Частотные распределения Vz-событий по месяцам года в двух системах координат (период 1995–2008 гг.) и корональных выбросов массы вблизи Земли (IGME) для периода 1995–2002 гг.



Рис.7. Частотные распределения вертикальной составляющей межпланетного поля в равноденствие в системах координат GSM и GSE (период 1995–2008 гг.)

являются значимыми следующие максимумы: 1. максимумы числа Vz-событий в системе GSE в мае, июле, августе, сентябре и октябре; 2. максимумы числа Vz-событий в системе GSM в апреле, мае, июле, сентябре и октябре; 3. максимумы корональных выбросов в мае, июле и августе. В системе GSM для Vz-событий значимы оба равноденственных максимума, однако в системе GSE выделяется более сильный осенний максимум. Для корональных выбросов существует один летний максимум. Следует отметить, что в июне-июле числа Vz-событий практически совпадают в обеих системах координат, т.е. эффект модуляции Vz-составляющей ММП отсутствует (угол наклона геомагнитного диполя к плоскости эклиптики близок к нулю).

Полученные результаты позволяют предположить следующее. Существует небольшой равноденственный максимум Vz ММП, который может быть связан с общим магнитным полем Солнца. В равноденствие положение Земли проецируется на более высокие солнечные широты, где значения общего магнитного поля могут быть несколько выше. Скорость солнечного ветра также возрастает с ростом гелиошироты [15]. Это объяснение может быть отнесено к «осевой» гипотезе. При взаимодействии солнечного ветра с магнитосферой в системе GSM равноденственный максимум усиливается за счёт модуляции Vz-составляющей ММП [3].

Модуляция Vz-составляющей в системе GSM демонстрируется на рис.7, на котором приведены распределения значений Vz для равноденствия в двух системах координат. Из рисунка видно, что большинство значений $|B_z| > 2$ нТл чаще появляется в системе GSM.

Одновременное существование летних максимумов Vz-событий, скорости солнечного ветра, корональных выбросов и магнитной активности в 23 цикле можно объяснить существованием геоэффективных потоков солнечного ветра из областей на активных кэррингтоновских долготах Солнца, которые оказались обращенными к Земле летом. Существование таких долгот отмечалось в [16,17]. Возможно, что присутствие активных долгот в летний период на видимом диске Солнца сохранялось в течение нескольких циклов, а также то, что максимум обеспечивался чрезвычайными событиями в летние месяцы одного-двух циклов. Повышение летом магнитной активности в индексах a_p и A_p может обеспечиваться в какой-то мере более высокой проводимостью ионосферы в авроральных и субавроральных широтах. Этот вопрос подлежит дальнейшему исследованию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Подтверждено наличие равноденственных максимумов магнитной активности для суточных значений Ар-индекса за период 1932–2011 гг., трёхчасовых индексов a_p и часовых индексов Dst за период наблюдений 1964–2009 гг.

2. Впервые показано существование статистически значимого летнего максимума магнитной активности на большом объеме данных наблюдений.

3. Показано, что наиболее отчетливо выражены равноденственные и летние максимумы для больших значений индексов, наблюдающихся в периоды сильных геомагнитных бурь, что согласуется с результатами предыдущих исследований.

4. Анализ сезонных распределений скорости солнечного ветра, Vz-событий в солнечном ветре в системах координат GSM и GSE и корональных выбросов в солнечном ветре показал, что:

- в период 1998–2003 гг. значения скорости солнечного ветра, превышающие 400 км/с, наиболее вероятны летом;

- распределение Vz-событий по месяцам года в 23 солнечном цикле в системе GSM имеет два равноденственных и летний максимумы, а в системе GSE отмечаются также осенний и летний максимумы;

- корональные выбросы массы в солнечном ветре, определённые в [14], в 23 цикле наиболее часто наблюдались летом.

5. Летний максимум магнитной активности в 23 цикле можно объяснить существованием на видимом диске Солнца активных долгот с повышенной частотой корональных выбросов.

6. Для объяснения равноденственных максимумов правомочно привлекать как «осевую», так и «равноденственную» гипотезы.

Авторы выражают благодарность А.Е. Левитину за участие в постановке задачи и обсуждении полученных результатов. Авторы благодарны В.Б. Лапшину и А.В. Тертышникову за поддержку и организацию публикации работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cortie A.L. Sunspot and Terrestrial magnetic phenomena 1898–1911. // Mon. Not. R. Astron. Soc. 1912. V.73. P. 520.
2. Bartels J. Terrestrial magnetic activity and its relation to solar phenomena. // Terr. Magn. Atmos. Electr. 1932. V.37. P. 1.
3. Russel C. T., McPherron R.L. Semiannual Variation of Geomagnetic Activity. // J. Geophys. Res. 1973. V.78. N1. P. 92.
4. Gonzalez W.D., Joselyn J.A. et al. What is a geomagnetic storm? // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. N A4. P. 5771
5. Echer E., Gonzalez W.D., Tsurutani B.T. Statical studies of geomagnetic storms with peak $Dst \leq -50$ from 1957 to 2008. // Journ. Terres. And Atmosf. Physics. V. 3. P. 1434.
6. McIntosh D.H. On the annual variation of magnetic disturbance. // Phil. Trans. Roy. Soc. London. Ser. A. 251. 1959. P. 525
7. Boller B.R., Stolov R. Instability and the Semiannual Variation of Geomagnetic Activity. // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. N 31. P. 6073
8. Svalgaard L., Cliver E.W., Ling A.G. The semiannual variation of great geomagnetic storms // Geophys. Res. letters / 2002, V.29. N 16. 1029/2001GL014145. P. 1765
9. Lyatsky W. and Tan A. Latitudinal effect in semiannual variation of geomagnetic activity // J. Geophys. Res., 2003. V.108. N A5, doi: 10.1029/2002JA009467 P.12-1.
10. Mursula K., Tanskanen E., Love J. Spring-fall asymmetry of substorm strength, geomagnetic activity and solar wind: Implications for semiannual variation and solar hemispheric asymmetry. // J. Geophys. Res. 2002. Letters. V.38. L06104. doi:1029/2011GL046751. 2011. L06104.
11. Кимбл Г. Как правильно пользоваться статистикой. - М.: Финансы и статистика, 1982. С. 294.
12. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика - М.: Физматлит. 1979. С. 495.
13. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. - М.: Мир, 1980. С. 299.
14. Cane H. V. and Richardson. Interplanetary coronal mass ejection in the near Earth solar wind during 1996-2002. // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. N A4. doi: 10/1029/2002JA009817. 1156.
15. Tokumaru M., Kojima M., and Ken'ichi Fujiki. Solar cycle evolution of the solar wind speed distribution from 1985 to 2008. // J. Geophys. Res. 2010 V. 115. N A04. doi:10.1029/2009JA014628. P.102.
16. Витинский. Ю. И., Копецкий И.М., Куклин Г.В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. -

М.: Наука, 1986. С. 296.

17. Иванов К. Г., Харшиладзе А.Ф., Ромашец Е.П. Солнечно-земные бури октября 2003 г. 1. Солнечные источники и межпланетные возмущения вблизи Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 2005 Т.45. No. 1. С. 5.

CONCERNING THE SEASONAL DEPENDENCE OF GEOMAGNETIC ACTIVITY

N.M. Rudneva, E.A. Ginzburg, L.A. Dremukhina, A.A. Nusinov

Frequency distributions of daily and hourly values indices of geomagnetic activity, as well as hourly values of geoeffective solar wind parameters have been analyzed for all seasons of year. It was confirmed that there are a statistically significant maxima of geomagnetic activity in equinox and summer. Arguments supporting “axial” and “equinoctial” mechanisms for appearing of equinoctial maxima are adduced. It was suggested that the summer maximum can occur as a result of the existence of active Carrington longitudes on the Sun.

KEYWORDS: INDECES OF GEOMAGNETIC ACTIVITY, SOLAR WIND PARAMETERS, FREQUENCY DISTRIBUTIONS, CORONAL MASS EJECTION, SEASONAL DEPENDENCE