

УДК 523.985

ИЗМЕНЕНИЕ ГЕЛИОДОЛГОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПИКОВЫХ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ С СОЛНЕЧНЫМИ ЦИКЛАМИ

© 2019 г. Ю. П. Очелков*

Федеральное государственное бюджетное учреждение
Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова, Москва, Россия

*E-mail: yur_och@mail.ru

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

На основе изучения двумерных распределений солнечных вспышек по пиковым интенсивностям мягких рентгеновских всплесков и солнечных протонных событий сделан вывод о том, что зависимость от гелиодолготы пиковой интенсивности солнечных протонных событий изменяется с солнечными циклами. Используются данные КА GOES по рентгеновским всплескам в диапазоне длин волн 0.1–0.8 нм и данные по наблюдениям солнечных протонных событий с пороговыми энергиями 30 МэВ. Было обнаружено, что гелиодолготное ослабление пиковой интенсивности протонных событий в различных циклах может отличаться на порядок величины. В частности, ослабление пиковой интенсивности протонных событий от вспышек в интервале гелиодолгот от 0° до 30° Е относительно пиковых интенсивностей протонных событий от вспышек на западной половине диска равно 30 для 23 цикла солнечной активности и только 3 для 22 цикла. Изменение с циклами гелиодолготной зависимости пиковых интенсивностей солнечных протонных событий следует учитывать во всех статистических исследованиях.

DOI: 10.1134/S0367676519050284

ВВЕДЕНИЕ

Исследование гелиодолготной зависимости пиковых интенсивностей наблюдаемых у Земли солнечных протонных событий важно для понимания механизма распространения солнечных протонов в солнечной короне и в межпланетном пространстве. Знание коэффициента гелиодолготного ослабления необходимо для статистических исследований протонных событий, а также для проблемы прогноза протонных событий по электромагнитному излучению вспышек. В таком исследовании следует учитывать различную природу пиковых интенсивностей протонных событий: формирование пиковой интенсивности в процессе диффузионного распространения в межпланетной среде или формирование пиковых интенсивностей из-за ускорения в межпланетных ударных волнах или ловушек в структурах ударных волн.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

В [1] рассмотрены различные методы, которые могут быть использованы для определения коэффициентов гелиодолготного ослабления пиковых интенсивностей солнечных протонных событий (см., например [2–5]). Здесь мы будем использо-

вать метод вычисления коэффициента гелиодолготного ослабления, предложенный в работе [1], основанный на исследовании двумерных интегральных распределений солнечных вспышек по пиковым интенсивностям мягких рентгеновских всплесков и пиковым интенсивностям протонных событий, построенных для различных интервалов гелиодолгот.

Было использовано двумерное интегральное распределение $N(J_x, J_p)$, где J_p – пиковая интенсивность протонного события в частицах $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ и J_x – пиковая интенсивность рентгеновских всплесков в $10^{-5} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ (значение $J_x = 1$ соответствует пиковой интенсивности рентгеновского всплеска класса M1). Используются данные КА GOES по рентгеновским всплескам в диапазоне длин волн 0.1–0.8 нм и данные по наблюдениям протонных событий с пороговыми энергиями 30 МэВ для 22, 23 и 24 циклов солнечной активности.

Функция $N(J_x, 0)$ – интегральное распределение по пиковым интенсивностям для всех всплесков (после которых протонные события либо наблюдались, либо не наблюдались). Отношение $N(J_x, J_p)/N(J_x, 0)$ – это вероятность всплесков с пиковыми интенсивностями, больше чем J_x , после которых наблюдались протонные собы-

тия с пиковыми интенсивностями, больше чем J_p , среди всех всплесков с пиковыми интенсивностями, больше чем J_x .

Значение этого отношения не зависит от долготы вспышки и должно испытывать слабые возмущения из-за статистических флуктуаций числа событий с гелиодолготой.

$$\begin{aligned} W_\varphi(J_x, J_p(\varphi)) &= N_\varphi(J_x, J_p(\varphi)) / N_\varphi(J_x, 0) = \\ &= N_\varphi(J_x, k(\varphi, \varphi_0)J_p(\varphi_0)) / N_\varphi(J_x, 0) = \quad (1) \\ &= N_{\varphi_0}(J_x, J_p(\varphi_0)) / N_{\varphi_0}(J_x, 0) = \text{const}(\varphi) \end{aligned}$$

здесь $J_p(\varphi) = k(\varphi, \varphi_0)J_p(\varphi_0)$, а $k(\varphi, \varphi_0)$ – коэффициент гелиодолготного ослабления, φ_0 – фиксированная гелиодолгота.

Отметим здесь, что статистические флуктуации числа событий с гелиодолготой могут быть очень велики из-за существования активных областей и комплексов активности (см., например, [6, 7]).

Коэффициент гелиодолготного ослабления можно вычислить, выбирая в выражении (1) коэффициент k так, чтобы вероятность (1) для гелиодолготы φ была равна вероятности для гелиодолготы φ_0 для всех J_x . На практике приходится вычислять коэффициент k не для отдельной гелиодолготы, а для гелиодолготных интервалов.

В [1] было показано, что как в 23, так и в 22 циклах значения $W_{60^\circ-90^\circ W}(J_x, J_p)$ и $W_{30^\circ-60^\circ W}(J_x, J_p)$ практически равны друг другу для одинаковых значений J_p . Это означает, что гелиодолготным ослаблением интенсивности солнечных протонных событий можно пренебречь для событий от всей западной половины диска. Это утверждение справедливо также и для последнего 24 цикла. Эти результаты согласуются с результатами работы [8], в которой было показано, что средние времена от вспышки до максимума протонного события практически не изменяются в интервале гелиодолгот $60^\circ W \pm 60^\circ$ и затем быстро растут за пределами этого интервала. Поэтому здесь мы будем рассматривать $W(J_x, J_p)$ для целого интервала $0^\circ-90^\circ W$. На рис. 1 построены интегральные рас-

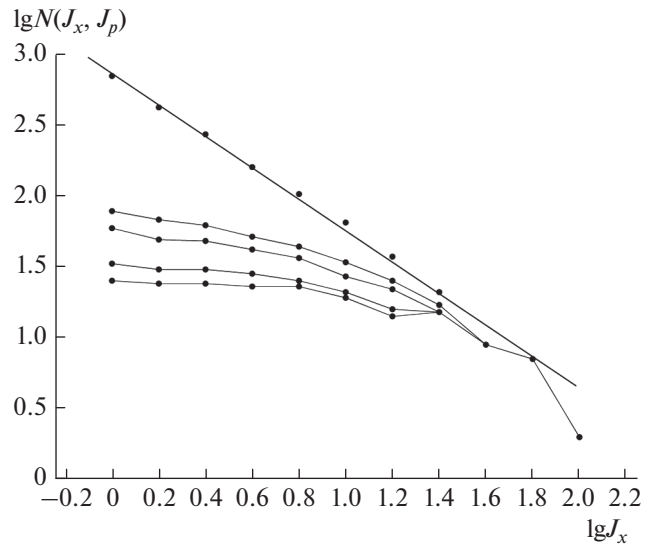


Рис. 1. Зависимости $N(J_x, J_p)$ от J_x в $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ для 23 цикла солнечной активности для $J_p = 0, 0.3, 1, 10, 30$ частиц/см² · с · ср (сверху вниз) для гелиодолготного интервала $0^\circ-90^\circ W$. Верхняя кривая – интегральное распределение по пиковым интенсивностям всех рентгеновских всплесков $N(J_x) = N(J_x, 0)$, которое является степенным (в логарифмических координатах прямая линия).

пределения $N(J_x, J_p)$ для гелиодолготного интервала $0^\circ-90^\circ W$ для 23 цикла.

Как следует из рис. 1, кривые для $N(J_x, J_p)$ для $J_p = 0.3, 1, 10, 30$ асимптотически приближаются к кривой для $N(J_x, 0)$. Начиная с $J_x = 0.8$, возникают статистические флуктуации из-за малого числа событий и наблюдаются отклонения от регулярного хода кривых.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Мы приведем здесь вычисления $W_\varphi(J_x, J_p)$ для 22 и 23 циклов солнечной активности из работы [1] (см. табл. 1, 2) и сделанные в этой работе вы-

Таблица 1

22 цикл	[90° W–90° E]	[90° W–0°)	[90° E–0°)	[90° W–30° W)	[30° W–0°)	[0°–30° E]	[30° E–90° E]
$N(1, 0)$	1569	876	693	564	312	288	405
$N(1, 0.3)$	73	54	19	37	17	14	5
$W(1, 0.3)$	0.046	0.06	0.027	0.065	0.055	0.049	0.012

Таблица 2

23 цикл	[90° W–90° E]	[90° W–0°)	[90° E–0°)	[90° W–30° W)	[30° W–0°)	[0°–30° E]	[30° E–90° E]
$N(1, 0)$	1325	695	630	512	183	263	367
$N(1, 0.3)$	97	77	20	55	22	13	7
$W(1, 0.3)$	0.073	0.11	0.032	0.11	0.12	0.049	0.019

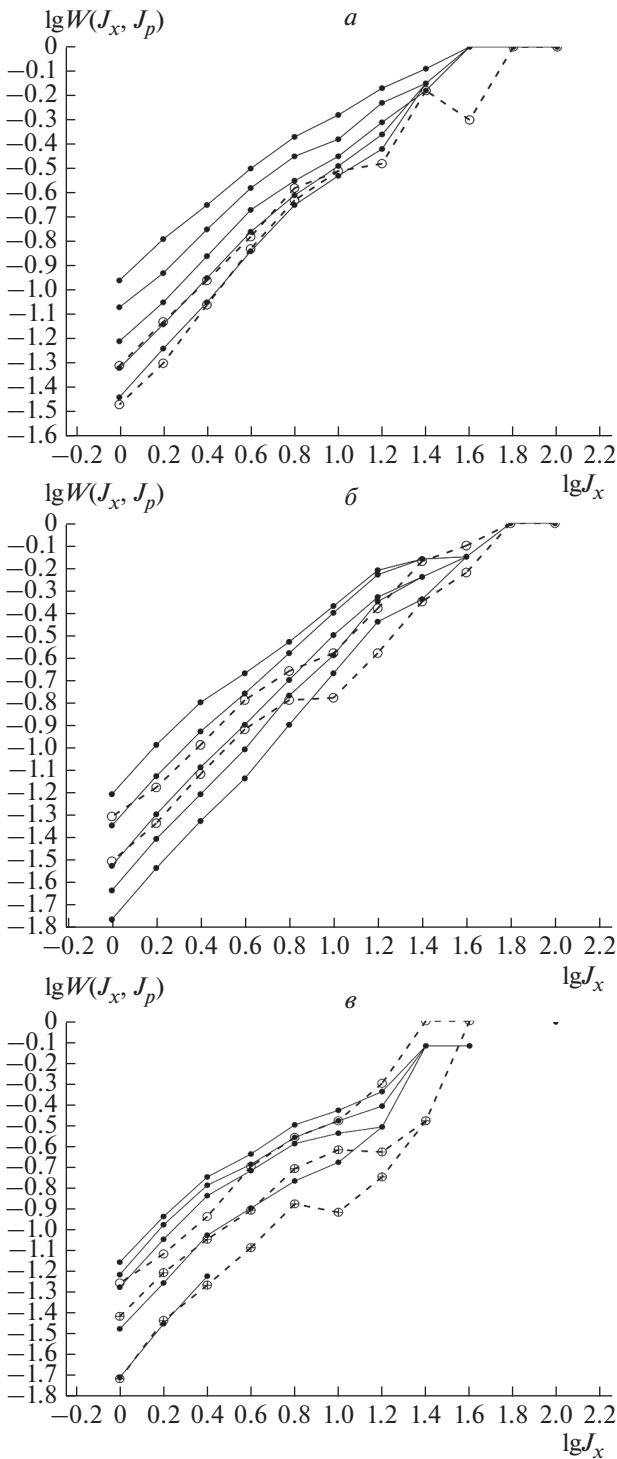


Рис. 2. Зависимости $W(J_x, J_p)$ от J_x в $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ (а – 23 цикл, б – 22 цикл, в – 24 цикл), сплошные линии со сплошными кружками для $J_p = 0.3, 1, 3, 10, 30$ частиц $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ (сверху вниз) для гелиодолготного интервала $0^\circ-90^\circ \text{W}$, штриховые линии с пустыми кружками для $J_p = 0.3, 1$ частиц $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ (сверху вниз) для гелиодолготного интервала $0^\circ-30^\circ \text{E}$, пунктирные линии с крестиком внутри кружка для $J_p = 0.3, 1$ частиц $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ (сверху вниз) для гелиодолготного интервала $0^\circ-90^\circ \text{E}$.

числения для 24 цикла для $J_p = 0.3$ частиц $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}$ и $J_x = 1$ в $10^5 \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ (табл. 3).

Графики функций $W(J_x, J_p)$ в зависимости от J_x для различных значений J_p приведены на рис. 2 для 23, 22 и 24 циклов для гелиодолготных интервалов $[90^\circ \text{W}-0^\circ]$ и $[0^\circ-30^\circ \text{E}]$.

Из рис. 2 следует, что для 23 цикла: $W_{0^\circ-30^\circ \text{E}}(J_x, 0.3) = W_{0^\circ-90^\circ \text{W}}(J_x, 10)$ (для $J_x < 1$). Это означает в соответствии с выражением (1), что: $J_p(0^\circ-30^\circ \text{E}) = 1/30 J_p(0^\circ-90^\circ \text{W})$ и $k(0^\circ-30^\circ \text{E}, 0^\circ-90^\circ \text{W}) = 1/30$. Этот вывод подтверждается также равенством: $W_{0^\circ-30^\circ \text{E}}(J_x, 1) = W_{0^\circ-90^\circ \text{W}}(J_x, 30)$, которое также следует из рис. 2 (эти результаты были получены в работе [1]). В то же время для 22 цикла следует, что $W_{0^\circ-30^\circ \text{E}}(J_x, 0.3) = W_{0^\circ-90^\circ \text{W}}(J_x, 1)$ для $J_x < 0.8$ и $W_{0^\circ-30^\circ \text{E}}(J_x, 1) = W_{0^\circ-90^\circ \text{W}}(J_x, 3)$, или: $J_p(0^\circ-30^\circ \text{E}) = 1/3 J_p(0^\circ-90^\circ \text{W})$ и $k(0^\circ-30^\circ \text{E}, 0^\circ-90^\circ \text{W}) = 1/3$. Таким образом, гелиодолготное ослабление в 22 цикле в 10 раз меньше чем в 23. Для 24 цикла, как следует из рисунка, $W_{0^\circ-30^\circ \text{E}}(J_x, 0.3) = W_{0^\circ-90^\circ \text{W}}(J_x, 3)$ (для $J_x < 0.8$) и поэтому $k(0^\circ-30^\circ \text{E}, 0^\circ-90^\circ \text{W}) = 1/10$. Для построения зависимости $W_{0^\circ-30^\circ \text{E}}(J_x, 1)$ от J_x в этом цикле было слишком мало протонных событий (39 с $J_p > 0.3$).

Поэтому для 24 цикла мы построили зависимости $W_{0^\circ-90^\circ \text{W}}(J_x, 0.3)$ и $W_{0^\circ-90^\circ \text{E}}(J_x, 1)$. Как следует из рисунка $W_{0^\circ-90^\circ \text{E}}(J_x, 0.3) = W_{0^\circ-90^\circ \text{W}}(J_x, 10)$ и $W_{0^\circ-90^\circ \text{E}}(J_x, 1) = W_{0^\circ-90^\circ \text{W}}(J_x, 30)$ и, следовательно, $k(0^\circ-90^\circ \text{E}, 0^\circ-90^\circ \text{W}) = 1/30$. Для 22 и 23 циклов эти коэффициенты равны $1/20$ и $1/150$ соответственно. Как следует из таблиц 1–3, наибольшее число протонных событий при заданном числе рентгеновских всплесков произошло в 23 цикле солнечной активности (в этом цикле коэффициент гелиодолготного ослабления пиковых интенсивностей протонных событий также был наибольшим). Наименьшее число протонных событий при заданном числе рентгеновских всплесков было в 22 цикле (в этом цикле коэффициент гелиодолготного ослабления пиковых интенсивностей протонных событий также был наименьшим).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как следует из проведенного анализа двумерных распределений солнечных вспышек по пиковым интенсивностям мягких рентгеновских всплесков и протонных событий, зависимость от гелиодолготы пиковой интенсивности протонных событий изменяется с солнечным циклом. Было обнаружено, что гелиодолготное ослабление пиковой интенсивности протонных событий в различных циклах может различаться на порядок величины. Из последних трех циклов наиболее

Таблица 3

24 цикл	[90° W–90° E]	[90° W–0°]	[90° E–0°]	[90° W–30° W]	[30° W–0°]	[0°–30° E]	[30° E–90° E]
$N(1, 0)$	754	361	393	253	108	107	286
$N(1, 0.3)$	39	25	14	18	7	6	8
$W(1, 0.3)$	0.051	0.069	0.035	0.071	0.065	0.056	0.028

сильное гелиодолготное ослабление наблюдалось в 23 цикле, а наиболее слабое в 22 цикле. Рассчитанные коэффициенты гелиодолготного ослабления равны:

23 цикл: $W_{90^\circ-90^\circ W}(1, 0.3) = 0.073$ $k(0^\circ-30^\circ E, 0^\circ-90^\circ W) = 1/30$, $k(0^\circ-90^\circ E, 0^\circ-90^\circ W) = 1/150$;

24 цикл: $W_{90^\circ E-90^\circ W}(1, 0.3) = 0.051$ $k(0^\circ-30^\circ E, 0^\circ-90^\circ W) = 1/10$, $k(0^\circ-90^\circ E, 0^\circ-90^\circ W) = 1/30$;

22 цикл: $W_{90^\circ E-90^\circ W}(1, 0.3) = 0.046$ $k(0^\circ-30^\circ E, 0^\circ-90^\circ W) = 1/3$, $k(0^\circ-90^\circ E, 0^\circ-90^\circ W) = 1/20$.

Зависимость гелиодолготного ослабления пиковых интенсивностей протонных событий от цикла следует учитывать во всех статистических исследованиях протонных событий, а также при разработке методов прогноза протонных событий по электромагнитному излучению вспышек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ochelkov Yu. P.* // J. Phys. Conf. Ser. 2013. V. 409. № 1. Art. no. 12183.
2. *Беловский М.Н., Очелков Ю.П.* // Бюл. Солнечные дан. АН СССР. 1976. № 12. 246 с.
3. *Очелков Ю.П.* // Геомагн. и аэрон. 1986. № 26. С. 1007.
4. *Lario D., Kallenrode M.B., Decker R.B. et al.* // Astrophys. J. 2006. V. 653. P. 1531.
5. *Smart D.F., She M.A.* // Adv. Space Res. 1996. V. 17. P. 113.
6. *Беловский М.Н., Очелков Ю.П., Переяслова Н.К. и др.* // Косм. исслед. 1982. Т. 20. С. 417.
7. *Коврижных О.М., Савенко И.А., Чупрова М.М.* // Косм. исслед. 1977. Т. 15. С. 401.
8. *Reinhard R., Wibberenz G.* // Solar Phys. 1974. V. 6. P. 473.