

УДК 523.62-726

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФЛЮЕНСОВ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ НА ОРБИТЕ ЗЕМЛИ, ПО ГЕЛИОДОЛГОТЕ ИСТОЧНИКОВ

© 2019 г. М. В. Подзолко*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

*E-mail: spacerad@mail.ru

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

Рассмотрено распределение флюенсов солнечных протонных событий по гелиодолготе источников в 19–24 циклах солнечной активности. Показано, что наибольший вклад в суммарную величину флюенсов протонов с энергиями >30 МэВ, зарегистрированных на орбите Земли за весь период наблюдений, внесен событиями, источники которых находились вблизи центрального видимого меридиана Солнца.

DOI: 10.1134/S0367676519050314

ВВЕДЕНИЕ

В работе на основе анализа данных экспериментальных измерений в 1956–2017 гг. изучается распределение флюенсов протонов в солнечных протонных событиях (СПС), зарегистрированных на орбите Земли, по наблюдаемой гелиодолготе источников их инъекции на Солнце. Это распределение характеризует распространение протонов, инжектированных во время солнечных вспышек.

Поскольку распространение энергичных заряженных частиц в гелиосфере связано с межпланетным магнитным полем, которое в силу вращения Солнца имеет форму спирали Паркера, принято считать оптимальным значение наблюдаемой гелиодолготы инъекции энергичных частиц для их прихода к Земле вблизи $\approx 50^\circ$ западной долготы. Распределение количества солнечных протонных событий, зарегистрированных наземными средствами или спутниками на околоземных орбитах, которое приводится, например, в [1], действительно имеет максимум около $W50^\circ$.

Однако если учитывать флюенсы протонов, наблюдается иная картина: распределение флюенсов солнечных протонов с энергиями >30 МэВ по гелиодолготе источников их инъекции имеет максимум вблизи центрального видимого меридиана Солнца. Этот результат впервые получен в работе И.В. Гецелева и др. [2] на основе экспериментальных данных за период с февраля 1956 г.

по июнь 2001 г., и подтвержден в данной работе на более длительном интервале наблюдений, включая полностью 23 и 24 циклы солнечной активности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В данной работе использовалась составленная нами база данных, содержащая сведения о ≈ 450 СПС в 19–24 солнечных циклах, собранные из разных источников, и включающие величину флюенса протонов с энергиями >30 МэВ и гелиодолготу солнечной вспышки, в ходе которой эти частицы были инжектированы.

Данные за 19 и 20 циклы взяты из различных опубликованных каталогов [3–6]. Для 19-го цикла измерения проводились с помощью различных способов (наземная аппаратура, шары-зонды, ракеты, первые космические аппараты (КА)); флюенсы протонов частично определялись косвенными методами по результатам ригметрических измерений, регистрации геомагнитных возмущений и всплесков радиоизлучения Солнца. По 20-му циклу данные о флюенсах протонов получены по помощи измерений на борту космических аппаратов.

За период с 1970-х гг. по настоящее время использовались длительные ряды измерений потоков межпланетных протонов на КА серии IMP на высоких околоземных орбитах и КА ACE в точке либрации L1 системы Солнце–Земля на расстоя-

нии – 1.5 млн км от Земли, которые имеются в открытом доступе [7]. По этим данным нами рассчитаны флюенсы протонов в СПС с энергиями >30 МэВ. При расчетах вычитались фоновые потоки протонов галактических космических лучей при помощи разработанного нами формализованного метода [8]. Привязка к источникам инъекции протонов на Солнце, начиная с 1976 г., бралась из базы данных NOAA [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

На основании указанных выше экспериментальных данных рассчитано распределение флюенсов протонов в СПС по гелиодолготе их источников на Солнце. Результаты расчетов показаны на рисунке. На верхнем графике показаны зарегистрированные около Земли флюенсы протонов (F) с $E > 30$ МэВ в СПС, для которых значение флюенсов составляло $\geq 10^7$ частиц \cdot см $^{-2}$, и их привязка к гелиодолготе источника (λ). На нижнем графике – рассчитанная для каждого 10-градусного интервала гелиодолгот доля инжектированных из этого интервала флюенсов протонов в СПС относительно суммарного флюенса по всем долготам за все время наблюдений.

Как видно из графиков, полученное распределение имеет выраженный максимум вблизи центрального меридиана. Суммарная доля флюенсов протонов с $E > 30$ МэВ, инжектированных из интервала гелиодолгот ($-20^\circ; +20^\circ$), составляет $\approx 60\%$ от суммарного флюенса по всем долготам. “Центр масс” распределения флюенсов лишь немного смещен в сторону западных долгот и находится примерно на $W10^\circ - 15^\circ$.

Такая же картина распределения флюенсов в СПС по гелиодолготе источников наблюдалась по отдельности в мощных 19, 20, 22 и 23 солнечных циклах.

Как видно из верхнего графика рис. 1, такой характер распределения обусловлен тем, что большинство наиболее мощных “экстремальных” солнечных протонных событий имели гелиодолготу инъекции вблизи центрального меридиана Солнца. В таблице приведен список экстремальных солнечных событий, в которых флюенс протонов с $E > 30$ МэВ составлял $\geq 2 \cdot 10^9$ см $^{-2}$. Как видно из таблицы, 6 из 7 таких событий, включая 3 самых мощных за всю историю спутниковых измерений: в ноябре 1960 г., августе 1972 г. и октябре 1989 г., имели гелиодолготы источников в интервале ($-10^\circ; +20^\circ$). Среди СПС с флюенсами протонов с $E > 30$ МэВ в интервале $5 \cdot 10^8 - 2 \cdot 10^9$ см $^{-2}$ 2/3 имели гелиодолготы источников в интервале ($-30^\circ; +40^\circ$), включая самые значительные всплески на спаде 23-го цикла в январе 2005 г. и в 24-м цикле в марте 2012 г. (значения флюенса $1.4 \cdot 10^9$ см $^{-2}$ и гелиодолготы $W5^\circ$ и $E15^\circ$ соответственно).

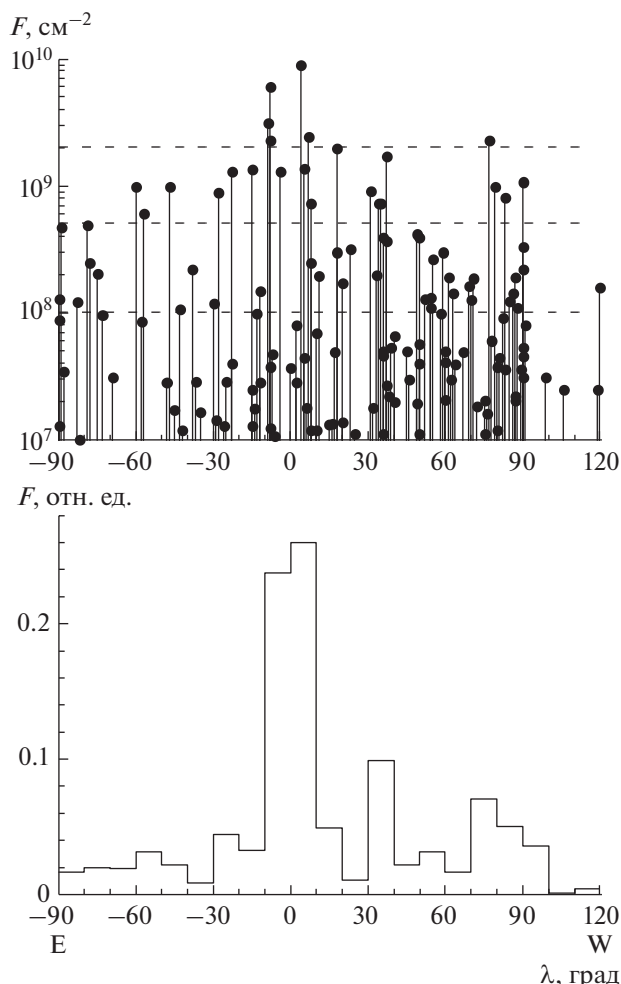


Рис. 1. Распределение флюенсов протонов с $E > 30$ МэВ в солнечных протонных событиях по гелиодолготе источников в 19–24 солнечных циклах.

В то же время, как видно из верхнего графика рисунка, большинство СПС с $E > 30$ МэВ с флюенсом протонов $< 10^8$ см $^{-2}$ имели гелиодолготы

Таблица 1. Характеристики экстремальных солнечных событий с флюенсом протонов с $E > 30$ МэВ $\geq 2 \cdot 10^9$ см $^{-2}$ в 19–24 циклах

| Дата регистр. СПС около Земли | Гелиодолгота, град | $F(>30 \text{ МэВ}), \text{ см}^{-2}$ |
|-------------------------------|--------------------|---------------------------------------|
| 1960-11-12 | 19 цикл 4W | $9.0 \cdot 10^9$ |
| 1972-08-04 | 20 цикл 8E | $8.0 \cdot 10^9$ |
| 1989-10-19 | 22 цикл 9E | $3.2 \cdot 10^9$ |
| 2000-07-14 | 23 цикл 7W | $2.5 \cdot 10^9$ |
| 2000-11-08 | 77W | $2.3 \cdot 10^9$ |
| 2001-11-04 | 18W | $2.0 \cdot 10^9$ |
| 2003-10-28 | 8E | $2.3 \cdot 10^9$ |

источников в интервале ($+30^\circ$; $+90^\circ$), что лучше соответствует имеющимся представлениям о распространении энергичных заряженных частиц в межпланетном пространстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проанализировано распределение флюенсов протонов с энергиями >30 МэВ в солнечных протонных событиях, зарегистрированных на орбите Земли, по гелиодолготам их источников в 19–24 циклах солнечной активности.

Показано, что это распределение имеет выраженный максимум вблизи центрального видимого меридиана Солнца. Около 60% от суммарной величины флюенса за все время наблюдений инжектировано из интервала гелиодолгот (-20° ; $+20^\circ$). Такой характер распределения обусловлен тем, что большинство наиболее мощных солнечных протонных событий имели гелиодолготу инжекции вблизи центрального меридиана Солнца.

Данный результат характеризует распространение энергичных заряженных частиц от солнечных вспышек в солнечной атмосфере и гелиосфере. Для выявления достоверных физических причин полученной картины необходим более тщательный анализ с учетом, в том числе, потоков протонов более высоких энергий и характеристик гелиосферы во время солнечных событий. Возможно полученный результат свидетельствует о том, что в большинстве наиболее мощных регистрируемых на орбите Земли солнечных протонных событий мы в значительной мере наблюдаем

потоки энергичных частиц, ускоренных ударными волнами в межпланетном магнитном поле. Это предположение в принципе согласуется, например, с теоретическими выводами в работах [10, 11].

Данное исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект № 17-29-01022. Автор благодарит коллег Г.А. Базилевскую, Л.И. Мирошниченко и И.Н. Мягкову за полезное обсуждение и ссылки на литературу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Belov A., Garcia H., Kurt V. et al.* // Solar Phys. V. 229. № 1. P. 135.
2. *Гецелев И.В., Охлопков В.П., Чучков Е.А.* // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 2003. № 5. С. 54.
3. *Долгинова Ю.К.* Солнечно-земная физика. Т. 2. М.: ИЗМИРАН, 1972.
4. *Акиньян С.Т., Базилевская Г.А., Ишков В.Н. и др.* Каталог солнечных протонных событий 1970–1979 гг. М.: ИЗМИРАН, 1982.
5. *King J.H.* // J. Spacecraft Rockets. 1974. V. 11. P. 401.
6. *Feynman J., Armstrong T.P., Dao-Gibner L., Silverman S.* // J. Spacecraft Rockets. 1990. V. 27. № 4. P. 403.
7. <http://spdf.gsfc.nasa.gov/>.
8. *Гецелев И.В., Подзолко М.В., Веселовский И.С.* // Астрон. вестн. 2009. Т. 43. № 2. С. 145; *Getselev I.V., Podzolk M.V., Veselovsky I.S.* // Sol. Sys. Res. 2009. V. 43. № 2. P. 136.
9. <http://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/>.
10. *Reames D.V., Barbier L.M., Ng C.K.* // Astrophys. J. 1996. V. 466. P. 473.
11. *Reames D.V.* // Space Sci. Rev. 1999. V. 90. № 3–4. P. 413.