

УДК 520, 523.9

ПОИСК СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРОНОВ ПО ДАННЫМ НЕЙТРОННОГО ДЕТЕКТОРА СПЕКТРОМЕТРА ПАМЕЛА

В. С. Горячева, С. А. Воронов, В. В. Михайлов

Данная работа посвящена разработке методики поиска нейтронов солнечного происхождения во время солнечных вспышек при помощи нейтронного детектора магнитного спектрометра ПАМЕЛА на спутнике РЕСУРС-ДК1. Исследование темпов счета нейтронного детектора показало, что в районе геомагнитного экватора он работает нормально и фоновые условия стабильны. Был проведен анализ 27 солнечных событий в период с декабря 2006 года по сентябрь 2014 года. В ряде событий есть свидетельства о регистрации нейтронов от Солнца. Для окончательного заключения о природе этих нейтронов требуется увеличение статистики, для чего необходим анализ фоновых условий в полярных областях, что позволит увеличить интервал наблюдения.

Ключевые слова: солнечные нейтроны, спутниковый эксперимент.

Единственным космическим источником, потоки нейтронов от которого можно зарегистрировать на Земле, является Солнце. Во время активных процессов на Солнце (в частности, солнечных вспышек) происходит ускорение заряженных частиц до больших энергий. Заряженные частицы, вступая в ядерные взаимодействия с атомами атмосферы Солнца, генерируют в частности энергичные нейтроны. Возникшие в реакциях нейтроны могут покинуть Солнце. Регистрация потоков и спектров таких нейтронов может служить для понимания процессов ускорения в солнечных вспышках, дать информацию о времени ускорения и потоках ускоренных частиц [1]. Так как нейтроны не обладают электрическим зарядом, то на траектории их движения не влияют магнитные поля, и они распространяются от места генерации до места регистрации в окрестности Земли по прямой, в отличие от заряженных частиц, которые имеют более сложную

Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 115409 Россия, Москва, Каширское шоссе, 31; e-mail: VVMikhailov@mephi.ru.

траекторию, “навиваясь” на силовые линии магнитного поля Солнца, проходя гораздо больший по сравнению с нейтронами путь [2].

Наблюдение солнечных нейтронов можно проводить с помощью наземных установок, ведущих постоянный мониторинг космического излучения. Однако при этом поток солнечных нейтронов будет заметно ослаблен из-за поглощения в атмосфере Земли. Поэтому исследование солнечных нейтронов предпочтительнее проводить высоко в горах или на космическом аппарате. До настоящего времени нейтроны были зарегистрированы в нескольких десятках солнечных вспышек [1]. С 2011 г. на международной космической станции проводится эксперимент SEDA-FIB по измерению энергии солнечных нейтронов [4]. Авторы работы проанализировали данные более 20 рентгеновских вспышек. В ряде событий был получен избыток в потоках нейтронов со стороны Солнца, в частности, статистически значимый эффект наблюдался 7 марта 2011 г., 7 марта 2012 г., 17 мая 2012 г., 8 апреля 2014 г. и для некоторых других событий.

В настоящей работе исследовалась возможность регистрации нейтронов солнечного происхождения с помощью нейтронного детектора, входящего в состав спектрометра ПАМЕЛА [3], установленного на спутнике РЕСУРС-ДК1.

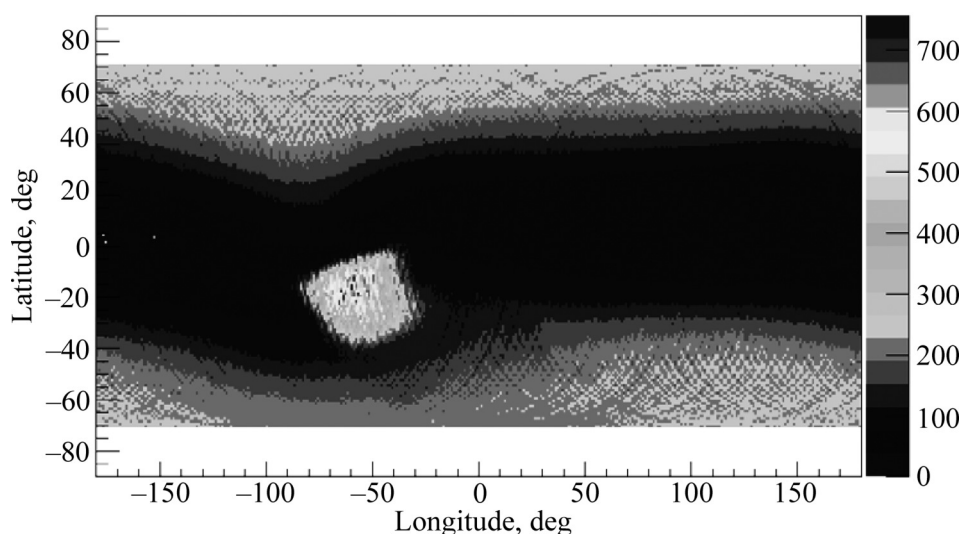


Рис. 1: Географическая карта темпа счета нейтронов.

Спутниковый эксперимент ПАМЕЛА [3], проводимый на спутнике РЕСУРС-ДК1, нацеленный на прецизионные измерения потоков заряженных частиц и античастиц в космическом излучении, был начат в июне 2006 года на полярной эллиптической орбите высотой 350–610 км. В состав экспериментальной установки помимо магнитного

спектрометра входит нейтронный детектор, который служит для идентификации заряженных частиц, регистрируя при этом и фоновые нейтроны. Он состоит из двух слоев по 18 цилиндрических пропорциональных счётчиков диаметром 18.5 мм и длиной 209 мм, наполненных газом $^3\text{He}_2$ под давлением 7 атмосфер, окруженных замедлителем, полиэтиленом. Фоновые нейтроны регистрируются в промежутках между регистрируемыми магнитным спектрометром заряженными частицами (фоновый канал). Именно этот канал и был использован для поиска солнечных нейтронов, поскольку обеспечивает непрерывный мониторинг потоков нейтронов.

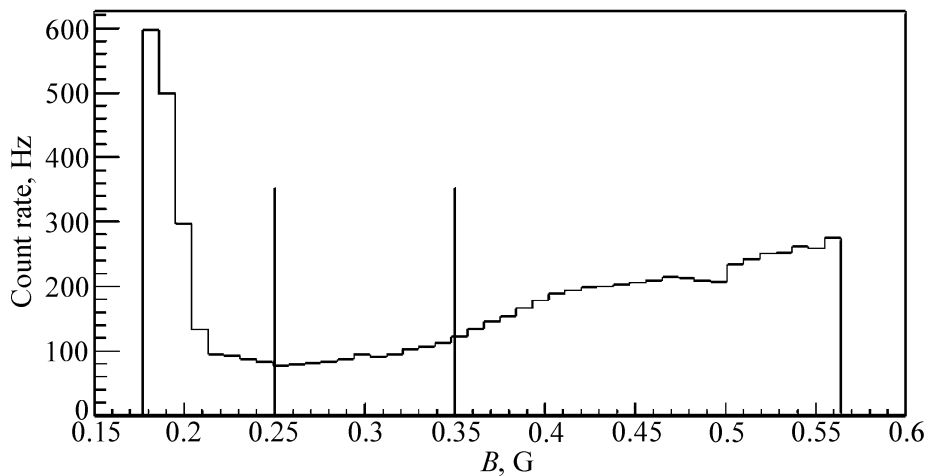


Рис. 2: Зависимость темпа счета нейтронного детектора от величины магнитного поля B . Вертикальные линии в области геомагнитного экватора, где темп счета минимален, показывают границы зоны минимальных вариаций фоновых потоков нейтронов.

Фоновые нейтроны рождаются в атмосфере и могут образовываться в веществе спутника в ядерных реакциях, вызванных космическим излучением. Для анализа работы нейтронного детектора были использованы данные за 2006–2010 года, когда орбита спутника была эллиптической и покрывала широкий диапазон высот. Географическая карта темпа счета нейтронов (рис. 1) отражает влияние геомагнитного поля. В области Бразильской магнитной аномалии и в полярных областях видно увеличение темпа счета, причем было получено, что для определения потоков в области радиационного пояса нужно учитывать высоту орбиты, так как от неё зависит темп счета. В полярных областях наблюдается значительное увеличение числа нейтронов фонового канала. Это часто приводило к переполнению памяти детектора нейтронов и искажениям при определении темпов счета. Полярные области и область Бразильской магнитной

аномалии были исключены из анализа ограничением на величину магнитного поля $0.25 < B < 0.35$ Гс, чтобы избежать высотных вариаций фона и переполнения памяти. На рис. 2 приведена зависимость темпа счета нейтронов от величины геомагнитного поля. В области геомагнитного экватора (область выделена двумя вертикальными полосами) наблюдается минимальный темп счета фоновых каналов детектора. Именно эта область была выбрана для поиска солнечных нейтронов, так как в ней фоновые условия стабильны по данным с 2006 по 2015 гг. и зависят практически только от жесткости геомагнитного обрезания.

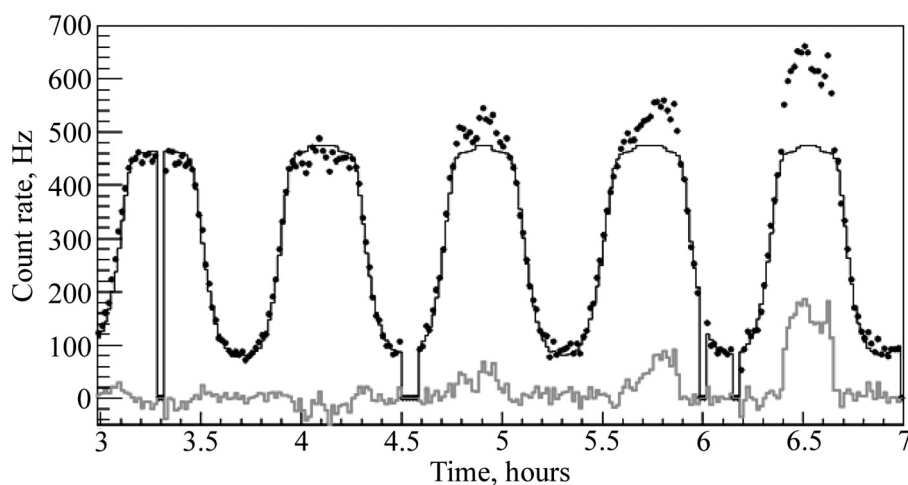


Рис. 3: Зависимость темпа счета нейтронного детектора от времени 23 января 2012 г.

На рис. 3 приведена зависимость темпа счета нейтронов от времени во время одной из солнечных вспышек (точки) и в спокойное время (тонкая линия). Избыток, который можно приписать солнечным нейтронам (толстая серая линия), необходимо искать до прихода высокоэнергетичных солнечных протонов, который наблюдался около 4 ч 45 мин и вызвал увеличение потока альбедных частиц.

В работе проведен анализ темпов счета нейтронного детектора для солнечных вспышек с 2006 по 2014 год, в которых возможны образования нейтронов, так как они сопровождались рентгеновским гамма-излучением. Список вспышек взят из работы [4] и дополнен данными магнитного спектрометра ПАМЕЛА по результатам наблюдений солнечно-протонных событий. Характеристики этих событий были взяты по данным GOES [5] и приведены в табл. 1. Данные измерений темпов счета нейтронного детектора во время солнечной вспышки сравнивались с темпами счета на одинаковых участках орбиты на витке, предшествующем вспышке. В качестве интервала времени наблюде-

Т а б л и ц а 1

Дата	Класс вспышки	Время начала вспышки	Возможное время наблюдения	Положение спутника в момент начала вспышки
06 December 2006	X9.0	10:35	10:35 – 10:42	Теневая сторона
13 December 2006	X3.4	02:40	03:07 – 04:06	Теневая сторона
14 December 2006	X1.5	22:15	22:15 – 22:46	Солнечная сторона
06 September 2011	X2.1	22:20	22:26 – 23:39	Теневая сторона
08 September 2011	M6.7	15:46	16:08 – 17:19	Теневая сторона
03 November 2011	X1.9	20:27	20:27 – 20:56	Солнечная сторона
07 March 2011	M3.7	20:12	20:12 – 21:08	Теневая сторона
07 June 2011	M2.5	06:16	06:16 – 07:08	Солнечная сторона
23 January 2012	M8.7	03:38	03:38 – 04:31	Солнечная сторона
27 January 2012	X1.7	17:37	17:59 – 19:07	Теневая сторона
05 March 2012	X1.1	04:05	04:05 – 04:15	Солнечная сторона
07 March 2012	X5.4	00:24	00:24 – 01:07	Солнечная сторона
09 March 2012	M6.3	03:45	04:01 – 05:02	Теневая сторона
13 March 2012	M7.8	17:25	17:47 – 18:58	Теневая сторона
17 May 2012	M5.1	01:47	01:47 – 02:20	Солнечная сторона
06 July 2012	X1.1	23:01	23:17 – 00:24	Теневая сторона
19 July 2012	M7.7	04:17	04:30 – 05:32	Теневая сторона
11 April 2013	M6.5	06:55	07:06 – 08:07	Теневая сторона
12 April 2013	M3.3	20:38	20:38 – 20:40	Теневая сторона
22 May 2013	M5.0	13:08	13:08 – 13:54	Солнечная сторона
06 January 2014	–	08:00	08:08 – 08:42	Теневая сторона
07 January 2014	X1.2	18:04	18:04 – 18:49	Солнечная сторона
01 September 2014	C1.6	18:03	18:03 – 18:46	Солнечная сторона
20 February 2014	M3.0	07:56	07:56 – 08:15	Солнечная сторона
08 July 2014	M6.5	16:20	16:20 – 16:29	Солнечная сторона
29 March 2014	X1.0	17:48	17:48 – 18:34	Солнечная сторона
18 April 2014	M7.3	13:03	13:03 – 13:52	Солнечная сторона

ния нейтронного сигнала рассматривался период от начала рентгеновской вспышки до начала появления потока солнечных протонов на орбите Земли. При этом учитывалось,

что спутник должен находиться на солнечной стороне Земли в области геомагнитного экватора. В ряде событий есть свидетельства о регистрации нейтронов от Солнца. Для окончательного заключения о природе этих нейтронов требуется увеличение статистики, для чего необходим анализ фоновых условий в полярных областях, что позволит увеличить интервал наблюдения. Использование модели рассеяния на ядре конечных размеров лучше согласуется с экспериментальным потоком, точность данной модели можно будет оценить после детального учета рельефа местности вблизи установки.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Xiao Xia Yu, Hong Lu, and Guan Ting Chen, *New Astronomy* **39**, 25 (2015).
- [2] В. Д. Кузнецов и др., *Солнечно-земная физика: Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф* (Под ред. В Д Кузнецова) (М., Физматлит, 2009).
- [3] O. Adriani, G.C. Barbarino, G.A. Bazilevskaya, et al., *Physics Reports* **544**(4), 323 (2014).
- [4] Y. Muraki, K. Koga, O. Okudaira, et al., *Proc. 33th ICRC* (Rio de Janeiro, 2013).
- [5] <http://goes.gsfc.nasa.gov/>

По материалам V Международной молодежной научной школы-конференции “Современные проблемы физики и технологий”.

Поступила в редакцию 12 июля 2016 г.