

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 524.1, 523.4-854

ПОИСК ВЗАИМОСВЯЗИ ВЫСЫПАНИЙ ЧАСТИЦ ИЗ РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ И КОСМИЧЕСКИХ ГАММА ВСПЛЕСКОВ

© 2021 г. Д. Н. Морозова*, А. Г. Майоров*

**Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия*

**E-mail: dashia110999@mail.ru*

Поступила в редакцию 03.03.2021 г.

После доработки 11.05.2021 г.

Принята к публикации 12.05.2021 г.

В работе изучается взаимосвязь высыпаний частиц из радиационного пояса Земли и космических гамма-всплесков. Для этого используются экспериментальные измерения потоков заряженных космических лучей в эксперименте PAMELA и наблюдения гамма-всплесков обсерваторией Fermi. Оба прибора одновременно работали на околоземной орбите в период с 2008 по 2016 гг. Для момента времени каждого гамма-всплеска, обнаруженного обсерваторией Fermi в указанный период времени, анализировалась скорость счета детекторов прибора PAMELA. Для поиска возможного сигнала от взаимодействия гамма-всплеска с заряженными частицами околоземного пространства построены ежегодные фоновые карты скоростей счета детекторов время-пролетной системы. Анализировалась разница между их фоновой скоростью счета и скоростью счета в момент прихода гамма-всплеска (в интервале времени за несколько минут до и после). Найдено несколько случаев, когда возникает значимое отклонение скорости счета от фонового значения в момент прихода гамма-всплеска, длящееся до 5–10 минут после этого.

Ключевые слова: радиационный пояс, возмущение, гамма-всплеск, PAMELA Fermi

DOI: 10.56304/S207956292006041X

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день существует множество экспериментов, посвященных регистрации потоков заряженных частиц в околоземном пространстве [1–6], одними из интереснейших результатов этих исследований являются периодически происходящие в широком диапазоне энергий всплески заряженных частиц [7–12]. Детально изучена взаимосвязь высыпаний частиц из радиационных поясов Земли с всплесками высокоэнергетических частиц, источниками которых являются различные солнечно-магнитные и геофизические процессы, в том числе катастрофические. В частности, хорошо известно, что за несколько часов до землетрясения в эпицентре образуется электромагнитное излучение, которое, распространяясь через атмосферу и ионосферу, может вызывать локальные возмущения траекторий электронов в радиационном поясе Земли, причем некоторые из них осаждаются на высотах спутников. Однако, не обнаружено работ, в которых внимание уделяется изучению подобного эффекта в случае электромагнитных импульсов, приходящих извне нашей галактики. Целью данной работы является поиск взаимосвязи высыпаний частиц из

радиационных поясов Земли и космических гамма-всплесков.

Для обнаружения зависимости общего потока частиц в околоземном пространстве от прихода гамма-излучения необходимо знать точное время регистрации гамма-всплесков, их длительность, характерные энергии, а также местоположение в пространстве. Возможности проведения подобного анализа предоставляют два эксперимента, проводившиеся независимо на одном длительном промежутке времени на околоземной орбите: Fermi [13] и PAMELA [14].

Космический эксперимент PAMELA проводился в период с 2006 по 2016 гг., и предназначался для изучения потоков заряженных частиц в околоземном пространстве, в том числе под внутренним радиационным поясом Земли, в частности, для анализа временной зависимости скоростей счета регистрируемых событий. В 2008 г. на орбиту была запущена космическая гамма-обсерватория Fermi Gamma-ray Space Telescope (FGST), в состав которой входит аппарат Gamma Burst Monitor (GBM), регистрирующий гамма-всплески.

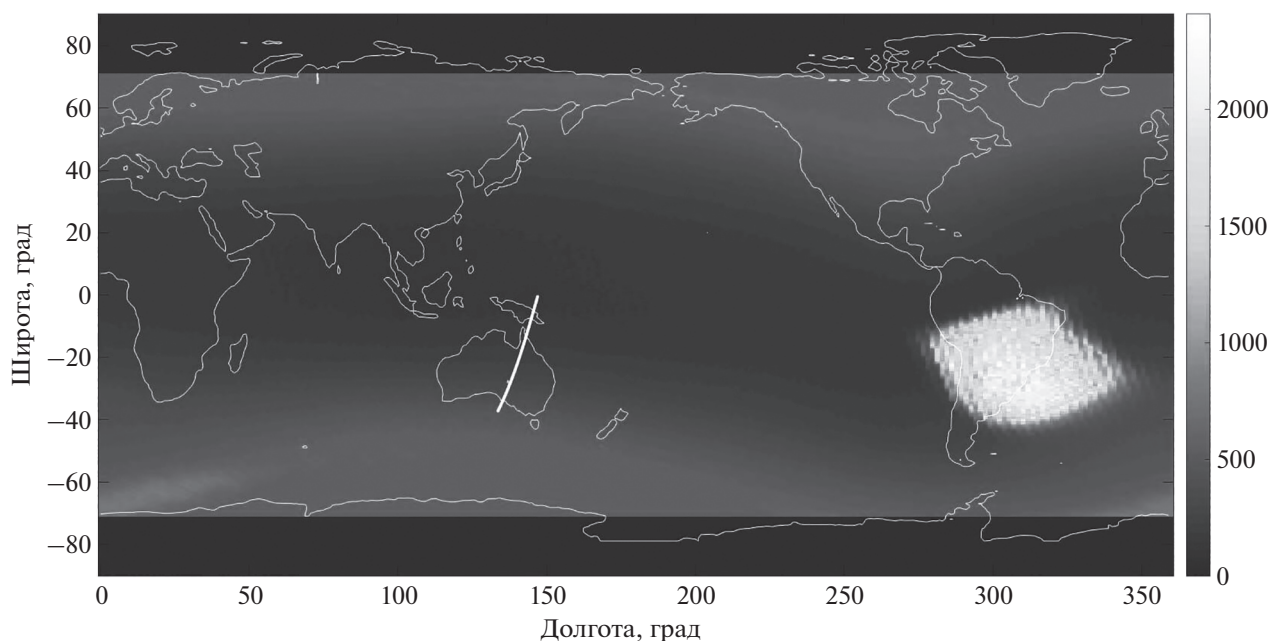


Рис. 1. Фоновая скорость счета прибора PAMELA в 2009 г. (нисходящие витки) с наложенной траекторией прибора в момент прихода гамма-всплеска 23 июня.

ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ДАННЫХ.

В работе использованы каталоги обсерватории Fermi, в которых хранится информация по регистрации гамма-всплесков прибором GBM. По данным таблицы гамма-всплесков Fermi в период работы спектрометра PAMELA детекторами GBM было отобрано 1783 гамма-всплеска. Из каталога взяты данные о длительности и абсолютном времени каждого всплеска, а также календарные даты регистрации обсерваторией Fermi.

У прибора PAMELA есть возможность регистрировать заряженные частицы в космических лучах, измерять их характеристики, кроме этого, в его состав входит времяпролетная система, которая позволяет регистрировать интегральная скорость счета попадающих в прибор частиц для шести различных конфигураций ToF1-ToF6 сцинтилляционных плоскостей.

Задача заключалась в поиске видимых изменений скорости счета прибора PAMELA в момент прихода гамма-всплеска относительно фоновой скорости счета. Под фоновой подразумевается интегральная скорость счета для одного из каналов времяпролетной системы, которые отличаются минимальными пороговыми энергиями зарегистрированных частиц, построенный в географической системе координат без учета высоты, усредненный за год.

Из всех всплесков отобраны те, которые были зарегистрированы, когда прибор PAMELA находился под внутренним радиационным поясом, так как в этой области пространства могло произойти

изменение скорости счета прибора, как следствие высыпания частиц, а также всплески длительностью более 30 с. Для отбора событий был применен критерий $L < 3.5$, $B > 0.23$ Гс, где L — магнитная оболочка и B — напряженность магнитного поля в месте нахождения прибора.

Для каждого года совместной работы экспериментов построены фоновые географические карты скорости счета прибора PAMELA с разделением на восходящие и нисходящие витки. На фоновые карты наложены траектории космического аппарата в диапазоне времени ± 5 мин от момента прихода гамма-всплеска. На рис. 1 изображена фоновая скорость счета прибора PAMELA в 2009 году для нисходящих витков, белой линией изображена траектория космического аппарата.

Построены зависимости скоростей счета спектрометра PAMELA от времени в диапазоне времени ± 5 мин от прихода гамма-всплеска и фоновой скорости счета для 6 конфигураций времяпролетной системы прибора. На рис. 2 приведен пример вышеназванной зависимости для гамма-всплеска, зарегистрированного 31 октября 2009 г. Скорость счета в момент прихода гамма-всплеска усреднена методом скользящего среднего и показана сплошной линией, пунктирная линия соответствует фоновой скорости счета. Также добавлена длительность гамма-всплеска, которая на рис. 2 изображена жирной линией. Для события, показанного на рис. 2, сплошная и пунктирная линия совпадают как до момента прихода гамма-

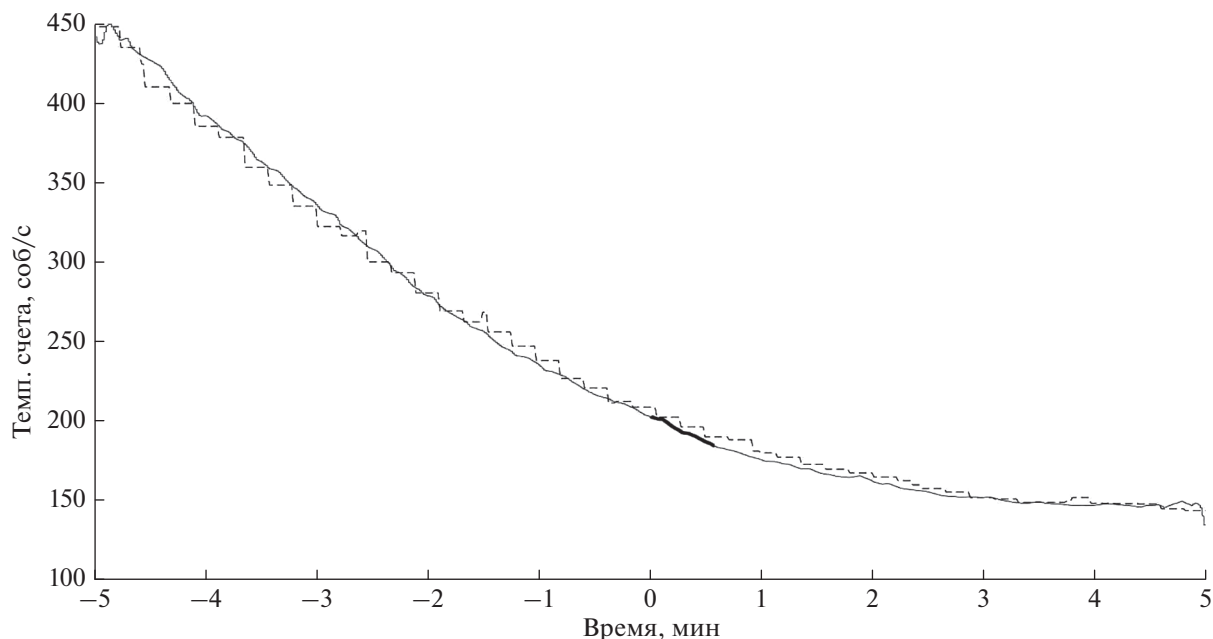


Рис. 2. Зависимость скорости счета прибора PAMELA для одной триггерной комбинации времяпролетной системы от времени в интервале ± 5 мин от момента регистрации гамма-всплеска для 31 октября 2009 г. (12:00:28).

всплеска, так и после, что говорит о том, что скорость счета прибора никак не менялась.

В результате обработки данных обнаружено событие, зарегистрированное 23 марта 2009 г., для которого на пяти из шести конфигураций (рис. 3) на-

блюдаются резкие отклонения скорости счета от фоновой в момент регистрации всплеска, они обозначены стрелками, и демонстрируют высывания частиц, предположительно, из-за прихода электромагнитного импульса от гамма-всплеска. В

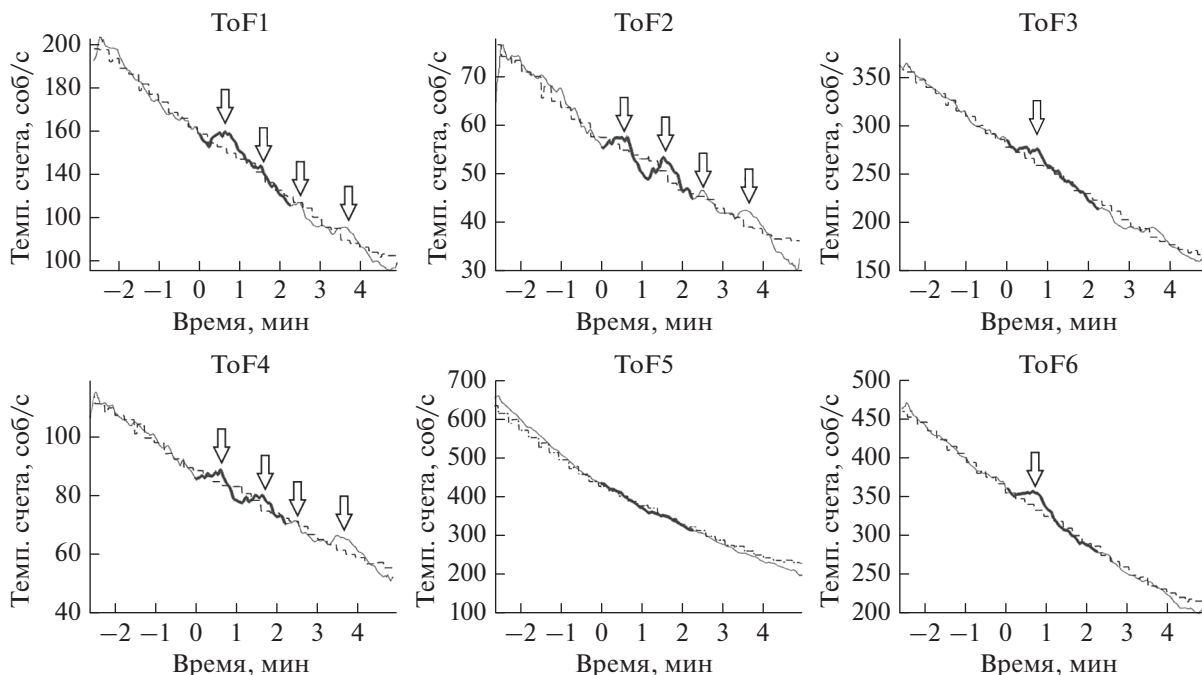


Рис. 3. Временные зависимости скоростей счета прибора PAMELA в конфигурациях ToF1–ToF6 в момент регистрации гамма-всплеска обсерваторией Fermi 23 марта 2009 г. (00:02:42).

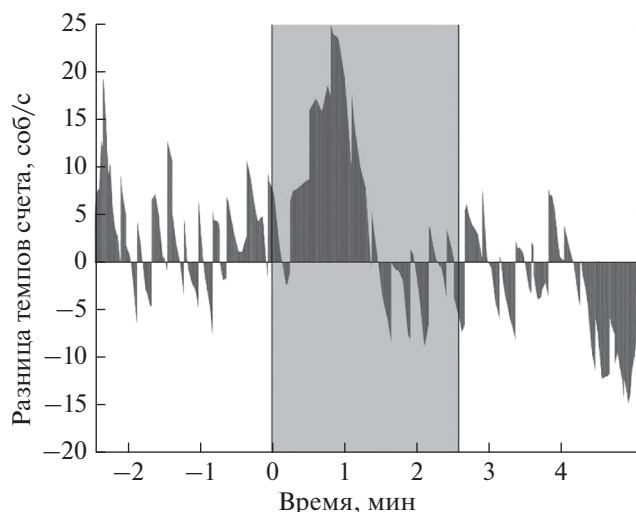


Рис. 4. Разность между скоростью счета, измеренной в момент прихода гамма-всплеска в интервале ± 5 мин от начала всплеска, в конфигурации ToF6 и фоновой скоростью счета, как функция времени, для события, зарегистрированного 23.03.2009.

некоторых каналах отклонения периодически повторяются, что может быть связано с долготным дрейфом частиц, в этом случае расстояние между пиками соответствует времени одного оборота высыпавшихся из радиационного пояса частиц вокруг Земли и составляет приблизительно 1 мин. Этими частицами могут быть электроны с энергией 100 МэВ или протоны с энергией 30 МэВ, данная оценка была проделана с помощью алгоритма, подробно описанного в работе [15]. Эффект на приведенных графиках выглядит по-разному из-за различающихся триггеров, что соответствует разным энергиям и топологиям события.

Для данного события вычислена разница между скоростью счета в момент прихода гамма-всплеска и фоновым значением скорости счета для 2009 года, в качестве примера рассмотрена конфигурация ToF6 (рис. 4). Отчетливо виден пик, наблюдаемый в затемненной области, которая соответствует длительности гамма-всплеска. Подобный эффект и ожидалось пронаблюдать в работе.

Для анализа достоверности обнаруженного события проведен расчет количества стандартных отклонений. Для этого построена гистограмма для разности скоростей счета прибора PAMELA в конфигурации ToF6, в которой не были учтены скорости счета, измеренные в период времени, когда регистрировался гамма-всплеск (рис. 5а), по ней вычислено стандартное отклонение. По гистограмме с учетом временного промежутка регистрации всплеска, эффект от которого выделен в круг (рис. 5б), посчитан центр масс. В построенных гистограммах оси ординат соответствует число временных интервалов, когда разница скоростей счета составляла заданное в бине значение. Количество стандартных отклонений для рассматриваемого события ~ 2.5 , это подтверждает гипотезу о том, что эффект от прихода гамма-всплеска присутствует.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена гипотеза о существовании взаимосвязи высыпаний частиц из радиационных поясов Земли с космическими гамма-всплесками. В результате обработки экспериментальных данных обнаружено событие, зарегистрированное 23 марта 2009 г., в котором наблюдается резкое увеличение скорости счета в момент прихода гамма-всплеска. Для данного случая проведен анализ

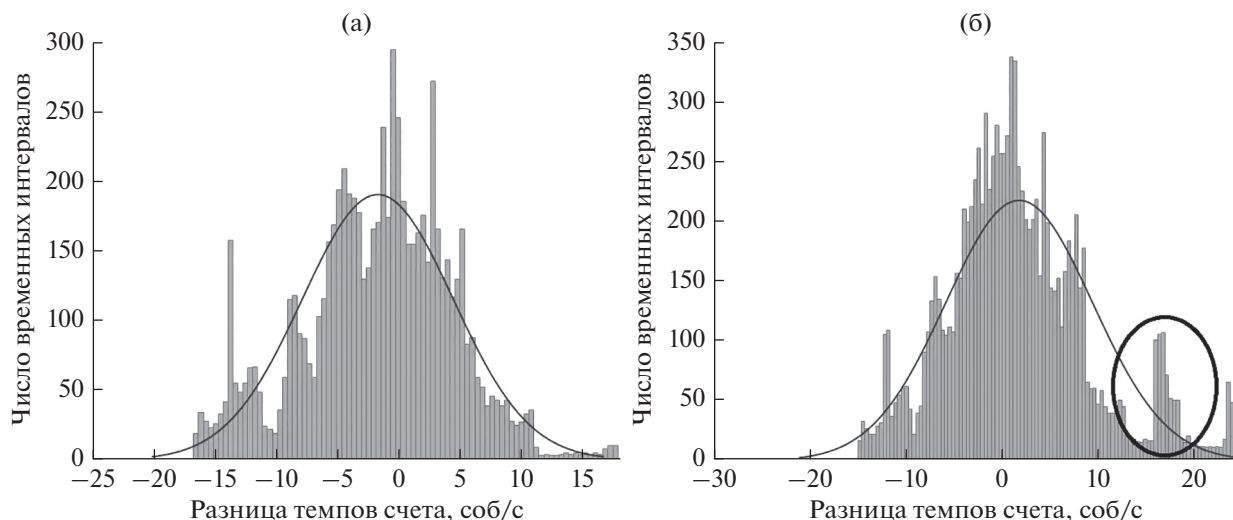


Рис. 5. Гистограммы без учета разности скоростей счета во время регистрации гамма-всплеска (а) и с учетом (б).

достоверности обнаруженного эффекта, который подтвердил наличие взаимосвязи между потоком заряженных частиц, регистрируемых спектрометром PAMELA, и произошедшим гамма-всплеском. Были обнаружены другие события, в которых скорость счета отклонялась от среднего не только в момент прихода всплеска, но и какое-то время после него. Предстоит провести анализ событий с таким эффектом.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-10161).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Akimov V.V., Voronov, S.A., Galper A.M. et al. // Space Sci. Rev., 1988. V. 49. P. 111–124.
2. Baker D.N., Mason G.M., Figueroa O. et al. // IEEE Geosci. Remote Sens. Mag., 1993. V. 31. P. 531–541.
3. Voronov S.A., Galper A.M., Koldashov S.V. et al. // Instrum. Exp. Tech. 1991. V. 2. P. 59–63.
4. Bakaldin A.V., Batishchev A.G., Voronov S.A. et al. // Proc. Scientific Session MEPhI–2007. 2007. V. 7. P. 66–68 (in Russian).
5. Alexandrov A.P., Voronov S.A., Galper A.M. et al. Preprint No. 035-88. 1988. Moscow: MEPhI (in Russian).
6. Aleksandrin S.Yu. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2009. V. 73. No. 3. P. 379–381.
7. Molchanov O.A., Majaeva O.A., Protopopov M.L. // Cosm. Res. 1992. V. 32. No. 6. P. 128–137.
8. Aleksandrin S.Yu. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2015. V. 79. No. 5. P. 646–648.
9. Aleksandrin S.Yu., Galper A.M., Koldashov S.V. et al. // Ann. Geophys. 2003. V. 21. P. 597.
10. Aleksandrin S.Yu. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2015. V. 79. No. 5. P. 646–648.
11. Galper A.M. et al. Proc. All-Union Conf. Cosmic Rays. 1988. Alma-Ata. V. 2. P. 191–194.
12. Galper A.M., Koldashov S.V., Voronov S.A. // Adv. Space Res. 1995. V. 15. P. 131.
13. von Kienlin A. et al. // Astrophys. J. 2020. V. 893. P. 46.
14. Picozza P. et al. // Astropart. Phys. 2007. V. 27. No. 4. P. 296–315.
15. Golubkov V.S. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2021. V. 85. P. 383.

Search for the Relationship Between Particle Eruptions from the Earth's Radiation Belt and Cosmic Gamma-Ray Bursts

D. N. Morozova¹, * and A. G. Mayorov¹

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: dashia110999@mail.ru

Received March 3, 2021; revised May 11, 2021; accepted May 12, 2021

The paper studies the relationship between particle precipitation from the Earth's radiation belt and cosmic gamma-ray bursts. For this purpose, experimental measurements of charged cosmic ray fluxes in the PAMELA experiment and observations of gamma-ray bursts by the Fermi observatory are used. Both instruments simultaneously operated in low-Earth orbit between 2008 and 2016. For the moment of time of each gamma-ray burst detected by the Fermi observatory in the specified time period, the counting rate of the PAMELA instrument detectors was analyzed. To search for a possible signal from the interaction of a gamma-ray burst with charged particles of near-Earth space, annual background maps of the counting rates of time-of-flight system detectors are constructed. The difference between the background counting rate and the counting rate at the moment of arrival of the gamma-ray burst (in the time interval a few minutes before and after) was analyzed. We found several cases where there is a significant deviation of the counting rate from the background value at the time of the arrival of the gamma-ray burst, which lasts up to 5–10 min after that.

Keywords: radiation belt, perturbation, gamma-ray burst, PAMELA Fermi