

**СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ С ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫМ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕМ  
И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКОВ ПРОТОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ****SOLAR FLARES WITH SUSTAINED GAMMA-RAY EMISSION  
AND SOME CHARACTERISTICS OF HIGH-ENERGY PROTON FLUXES****В.М. Томозов***Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, tom@iszf.irk.ru***†Г.С. Минасянц***Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова НАН РК,  
Алматы, Казахстан***Т.М. Минасянц***Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова НАН РК,  
Алматы, Казахстан***V.M. Tomozov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, tom@iszf.irk.ru***†G.S. Minasyants***Fesenkov Astrophysical Institute,  
Almaty, Kazakhstan***T.M. Minasyants***Fesenkov Astrophysical Institute,  
Almaty, Kazakhstan*

**Аннотация.** Описаны характеристики потоков продолжительного гамма-излучения с энергиями квантов  $>100$  МэВ, полученные по данным космического аппарата Fermi/LAT, на импульсной фазе наиболее энергичных вспышечных явлений. Проведено сравнение данных GOES о потоках протонов с энергиями более 500 МэВ с данными Fermi/LAT о потоках гамма-излучения за 2010–2018 гг. По результатам анализа данных о 32 гамма-вспышках из каталога Fermi/LAT было показано, что вспышечные явления можно отнести к трем различным типам: тип 1 — потоки гамма-излучения сопровождаются потоками энергичных протонов; тип 2 — гамма-излучение регистрируется при отсутствии возрастаний потоков протонов; тип 3 — во время возрастаний потоков энергичных протонов не регистрируются гамма-потоки. Отмечен всплесковый характер выделения энергии в жестком рентгеновском диапазоне у некоторых вспышек.

**Ключевые слова:** вспышки, корональные выбросы массы, ускорение частиц.

**Abstract.** We describe the characteristics of long-term gamma fluxes with quantum energies  $>100$  MeV, obtained from Fermi/LAT data during the impulsive phase of the most energetic flare phenomena. We compare GOES data on proton fluxes with energies  $>500$  MeV with Fermi/LAT data on gamma fluxes for the period 2010–2018. The results of the analysis of all data obtained on 32 gamma-ray flares from the Fermi/LAT catalog show that the flare phenomena can be classified into three different types: type 1 — gamma fluxes accompanied by energetic proton fluxes; type 2 — gamma rays recorded in the absence of increases in proton fluxes; type 3 — gamma fluxes not recorded during observed increases in energetic proton fluxes. The burst character of energy release in the hard X-ray range was noted in some flares.

**Keywords:** flares, coronal mass ejections, particle acceleration.

**ВВЕДЕНИЕ**

Главной причиной ускорения и нагрева частиц на импульсной фазе солнечных вспышек является выделение свободной магнитной энергии при диссипации в токовых слоях активных областей при магнитном пересоединении с последующим стохастическим ускорением вследствие развития неустойчивостей плазмы [Алтынцев и др., 1982; Прист, Форбс, 2005; Somov, 2013]. Во вспышках (особенно в протонных событиях) происходит также ускорение частиц на фронтах ударных волн, которые возникают при корональных выбросах массы (КВМ) из вспышечно-активных областей. Согласно современным представлениям, возникновение вспышек и сопутствующих им выбросов плазмы связано с нарушением равновесия магнитных структур активных областей в ходе их эволюции. Структура магнитных полей активной области, где над линиями раздела полярностей магнитного поля располага-

ются волокна, усложняется под влиянием сдвиговых (и иных) движений в подножиях магнитных петель вдоль нейтральных линий поля. Вследствие этого волокно (протуберанец) над нейтральной линией поля теряет устойчивость и начинает подниматься вверх с ускорением, приводя к открыванию магнитной структуры и формированию «ядра» КВМ в короне [Golovko et al., 1986].

На импульсной фазе в области выделения энергии вспышки наблюдаются быстро движущиеся потоки нагретой плазмы и ускоренных заряженных частиц, частично проникающие в нижние слои солнечной атмосферы через трубки магнитного потока. При взаимодействии энергичных частиц с плотной плазмой в подножиях магнитных петель генерируется жесткое рентгеновское излучение и, возможно, гамма-радиация и происходит нагрев плазмы. Быстрый нагрев плазмы в фотосфере и хромосфере приводит к ее «испарению» и подъему и к заполнению всего объема магнитных арок. На этой фазе наблю-

дается возрастание потока рентгеновского излучения. Затем следует основная фаза вспышки, когда нагретая плазма в системе арок длительное время излучает в рентгеновской области спектра, постепенно теряя энергию [Лившиц, 2008]. Одновременно потоки частиц, ускоренных в области вспышки, взаимодействуют с развивающимся КВМ. Это приводит к ускорению вспышечных протонов на фронте ударной волны КВМ, который распространяется в верхние слои короны и в межпланетную среду. Возможно также дополнительное ускорение частиц в токовом слое в области позади фронта КВМ, уходящего в корону [Manchester et al., 2017].

Согласно результатам работы [Murphy et al., 1987], при взаимодействии с плазмой солнечной атмосферы протоны с энергией  $E$  более 300 МэВ способны генерировать нейтральные и заряженные пионы, при распадах которых генерируется гамма-излучение. В тех случаях, когда протоны во вспышке ускоряются до  $E > 500$  МэВ, нейтральные пионы становятся источниками эмиссии гамма-квантов с высокими энергиями более 100 МэВ, регистрируемых приборами космического аппарата (КА) Fermi/LAT. Ударные волны КВМ рассматриваются как основные источники ускорения солнечных протонов до  $E > 500$  МэВ как в солнечной короне, так и межпланетной среде [Tylka et al., 2014]. В работах [Gopalswamy et al., 2018, 2019] была обнаружена линейная корреляция между длительностью радиовсплесков II типа в межпланетной среде и продолжительной гамма-эмиссией. Этот результат подчеркивает важную роль ударных волн КВМ в ускорении протонов до высоких энергий на больших расстояниях в короне и гелиосфере. В работах Share et al. [2017, 2018] был представлен и проанализирован обширный наблюдательный материал по 32 вспышкам с длительным гамма-излучением, зарегистрированным КА Fermi/LAT в 2008–2017 гг.

В представленной работе проведено сопоставление интенсивности потоков гамма-излучения с  $E > 100$  МэВ, образованных при ядерных реакциях энергичных протонов ( $E > 500$  МэВ) в ходе эволюции вспышек, со временем начала КВМ; количественные оценки потоков высокоэнергичных протонов получены с помощью инструментов, размещенных на КА. Для анализа событий были использованы данные из каталога [Share et al., 2017, 2018]. Приведены характеристики некоторых вспышечных событий из указанного каталога.

## ПОТОКИ ЭНЕРГИЧНЫХ ПРОТОНОВ ВО ВСПЫШКАХ С ДЛИТЕЛЬНЫМ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕМ

Одиннадцатого октября 2013 г. активная область располагалась на гелиошироте E101, т. е. за восточным лимбом, поэтому не было возможности построить временной профиль изменения относительной интенсивности фотосферной яркой эмиссии во время вспышки. Рисунок 1, а представляет вариации потока рентгеновского излучения в диапазоне 1–8 Å для события 11 октября 2013 г. и его времен-

ной производной (данные КА GOES), нулевая величина которой определяет границу между импульсной и основной фазами вспышки. Как было ранее показано в работе [Minasyants et al., 2018], профиль производной потока рентгеновского излучения на импульсной фазе хорошо коррелирует с поведением относительной интенсивности потока частиц плазмы вспышки на фотосферном уровне  $\lambda 1700$  Å. Благодаря относительно длительному интервалу взаимодействия КВМ с потоком частиц плазмы вспышки в событии 11 октября 2013 г., оказалось возможным наблюдать более детально вариации потока  $F_\gamma$  гамма-излучения с  $E > 100$  МэВ.

Выделение энергии в солнечных вспышках часто имеет нерегулярный характер и регистрируется в форме всплесков, что было подтверждено лабораторными экспериментами [Алтынцев и др., 1982; Прист, Форбс, 2005]. Подобный характер выделения энергии наблюдался в спектре жесткого рентгеновского излучения в событии 10 сентября 2017 г. (см. рис. 1, б). В работе [Минасянц и др., 2019] для события 10 сентября 2017 г. авторы сравнили изменения со временем характеристик потоков гамма-квантов с  $E > 100$  МэВ и протонов. Наблюдаемое совпадение в поведении этих параметров подтвердило основную роль протонов в формировании высокоэнергичного гамма-излучения на импульсной фазе вспышек. Очень высокая скорость при распространении ударного фронта КВМ 10 сентября 2017 г., несомненно, повлияла на параметры потока гамма-излучения, поскольку наблюдалось усиление  $F_\gamma$  с  $E > 100$  МэВ почти на два порядка величины по сравнению с другими событиями (таблица, столбец 6):  $F_\gamma = 0.013 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Поток гамма-излучения оказался максимальным для гамма-событий за весь период наблюдений Солнца Fermi/LAT.

Мы сравнили времена начала развития КВМ, возрастания потоков гамма-квантов с  $E > 100$  МэВ и максимума вспышек по изменению относительной интенсивности фотосферной эмиссии на импульсной фазе вспышек. С этой целью мы проанализировали данные КА Fermi по гамма-излучению, которые были представлены в работах [Share et al., 2017, 2018; Omodei et al., 2018]. Событие 9 августа 2011 г. интересно тем, что появление КВМ (в 08:02 UT) совпало с максимумом импульсной фазы вспышки, которая ведет к ускорению частиц и нагреву плазмы. Вследствие этого в данном событии ускорение частиц в результате магнитного пересоединения и дополнительное ускорение протонов на ударном фронте КВМ (типичный процесс для основной фазы в длительных протонных событиях) совпадают по времени с импульсной фазой вспышки.

Наблюдения потоков гамма-излучения с энергией более 100 МэВ, сопровождающих солнечные вспышки, на интервалах времени от минут до часов показали, что высокоэнергичные частицы, взаимодействующие с солнечной атмосферой, могут накапливаться и/или ускоряться сравнительно долгое время. Случаи, когда гамма-излучение было зарегистрировано даже при появлении КВМ за солнечным лимбом по наблюдениям с Земли, обеспечили благоприятные условия для изучения роли корональных удар-

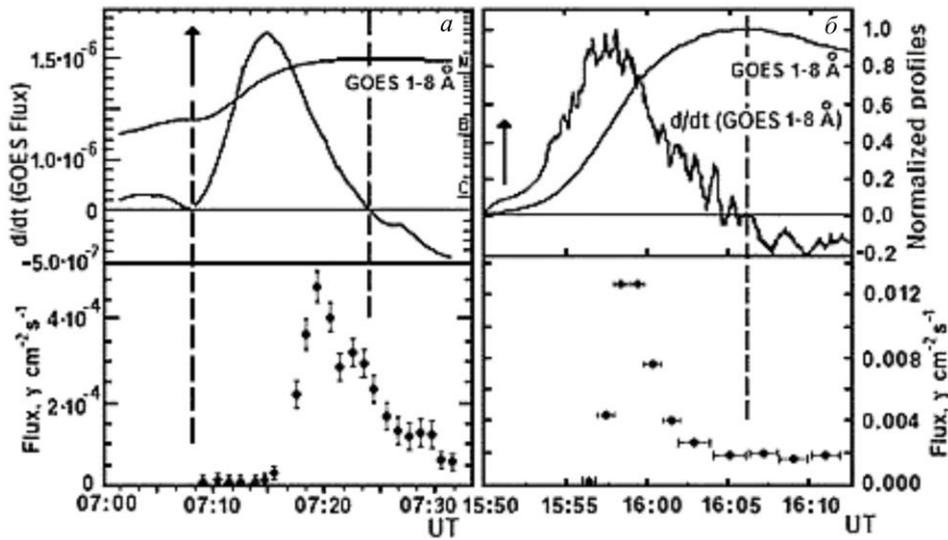


Рис. 1. Поток рентгеновского излучения  $F_X$  в области 1–8 Å и его временная производная  $d/dt$  (вверху, правая панель — нормализованные кривые), а также поток гамма-квантов с энергиями  $>100$  МэВ (внизу) [Минасянц и др., 2019] для событий M1.9 (N21, E101) 11 октября 2013 г. (а) и X8.2 (S08, W88) 10 сентября 2017 г. (б). Импульсная фаза вспышки: 07:08–07:24 UT (а) и 15:50–16:06 UT (б); начало KBM (показано вертикальной стрелкой): 07:08 UT (а) и 15:51 UT (б); вертикальные штриховые линии ограничивают импульсную фазу вспышки. Данные взяты из каталога солнечных вспышек [[https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/UNIVERSAL\\_ver1/2017\\_09/univ2017\\_09.html](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL_ver1/2017_09/univ2017_09.html)]

Характеристики событий, полученные по наблюдениям с различных космических аппаратов

№	Даты вспышек и время начала (UT)	Рентгеновский класс и координаты вспышки	Скорость KBM, км/с	Поток протонов с $E > 10$ МэВ, pfu	Длительность гамма-потоков с $E > 100$ МэВ, ч	$F_{\gamma \max}$ с $E > 100$ МэВ, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
	1	2	3	4	5	6
1	27.01.2012, 17:37	X1.7 N35W81	2508	796	2.0	$3.5 \cdot 10^{-5}$
2	07.03.2012, 00:02	X5.4 N17E15	2684	6530	14.4	$2.0 \cdot 10^{-3}$
3	17.05.2012, 01:25	M5.1 N05W77	1582	255	2.1	$1.2 \cdot 10^{-5}$
4	10.09.2017, 15:44	X8.2 S08W83	3163	1490	11.6	$1.3 \cdot 10^{-2}$
5	06.09.2011, 22:12	X2.1 N14W18	1000	8	0.2	$1.7 \cdot 10^{-4}$
6	07.09.2011, 22:32	X1.8 N18W32	792	–	0.3	$8.0 \cdot 10^{-6}$
7	23.01.2012, 03:38	M8.7 N33W21	2175	6310	5.3	$2.0 \cdot 10^{-3}$
8	06.09.2017, 11:53	X9.3 S08W33	1571	15	9.7	$4.5 \cdot 10^{-5}$
9	22.05.2013, 13:08	M5.0 N15W70	1466	1660	–	–

ных волн, вызванных KBM. Было получено свидетельство того, что высокоэнергичные протоны, генерирующие продолжительную гамма-эмиссию, обязаны своим происхождением ударным волнам, вызванным KBM, так же как и солнечные энергичные частицы, измеренные в межпланетной среде [Plotnikov et al., 2017; Grechnev et al., 2018].

В большинстве случаев начало выброса коронального вещества предшествовало началу импульсной фазы вспышек. Всего в трех событиях — 7 марта 2012 г., 25 февраля 2014 г. и 6 сентября 2011 г. — были зарегистрированы потоки гамма-излучения с  $E > 100$  МэВ на главной фазе развития вспышек в пределах значений, относящихся к импульсной фазе этих вспышек.

Выполнен анализ наблюдательных данных КА GOES/NEPAD по потокам протонов с различными энергиями, зарегистрированным вблизи Земли в 2010–2018 г. Только в пяти из восьми вспышечных событий были зарегистрированы потоки протонов с энер-

гиями 375, 465, 605 МэВ и  $<700$  МэВ (см. таблицу, события 1–4, 9). Заметим, что только четыре события (№ 1–4: 27 января, 7 марта и 17 мая 2012 г. и 10 сентября 2017 г.) были связаны со вспышками с продолжительным гамма-излучением с  $E > 100$  МэВ. Вспышка 22 мая 2013 г. не относилась к этим событиям, поскольку вызвала только кратковременное возрастание потока гамма-излучения, которое лишь слегка превышало фоновые значения (рис. 2, 3). Для событий с гамма-излучением с  $E < 100$  МэВ потоки протонов с  $E > 500$  МэВ, зарегистрированные КА GOES вблизи Земли, соответствовали условиям эффективного взаимодействия протонов с окружающей плазмой при формировании гамма-квантов. Share et al. [2017] было найдено, что крупномасштабные потоки солнечных энергичных протонов вблизи Земли подвержены минимальным потерям частиц, когда вспышки на Солнце происходят вблизи номинальной долготы W58. Эти потери нарастают экспоненциально в обоих направлениях в интервале долгот между W20

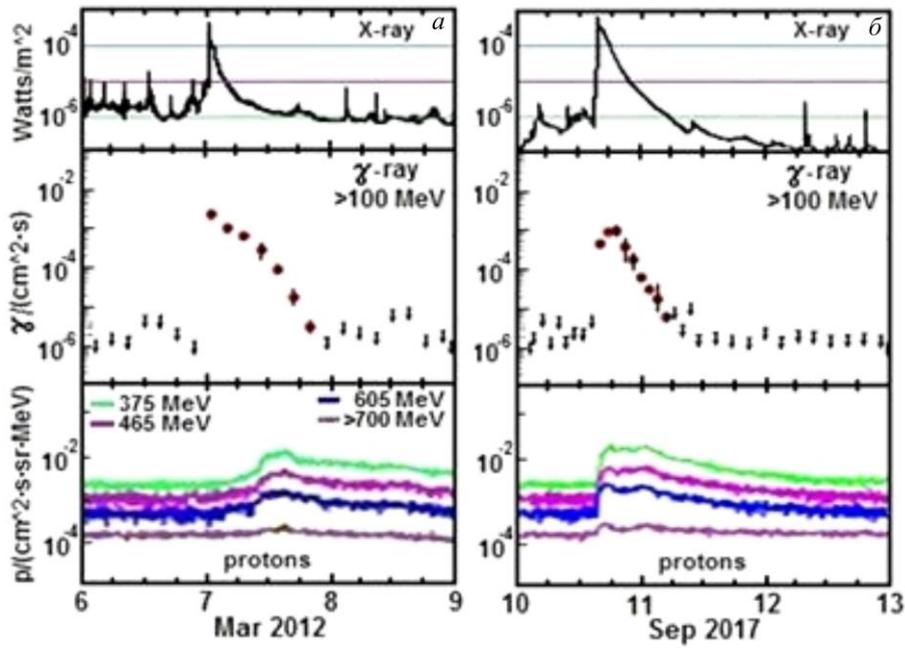


Рис. 2. Эволюция потоков рентгеновского излучения в области 1–8 Å (GOES), потоков гамма-излучения с  $E > 100$  МэВ (Fermi/LAT) и потоков высокоэнергичных протонов (GOES) для событий класса 1: *a* — 7 марта 2012 г.; *б* — 10 сентября 2017 г. Данные КА GOES [<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/dataaccess.html>]

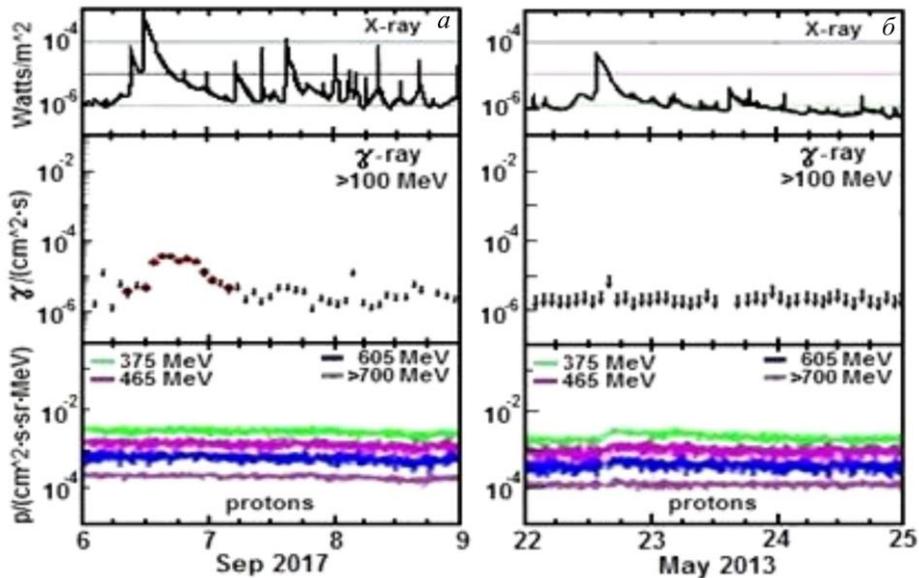


Рис. 3. Эволюция потоков рентгеновского излучения в области 1–8 Å (GOES), потоков гамма-излучения с энергиями  $> 100$  МэВ (Fermi/LAT) и потоков высокоэнергичных протонов (GOES) для событий классов 2 (*a* — 6 сентября 2017 г.) и 3 (*б* — 22 мая 2013 г.). Данные КА GOES [<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/dataaccess.html>]

и W90, и за пределами этого интервала результаты экстраполяции потоков частиц могут быть подвержены ошибкам.

В таблице представлены сведения об отдельных вспышках и характеристики сопровождавших их явлений. В столбце 3 приведены линейные скорости KBM, в столбце 4 — потоки протонов с  $E > 10$  МэВ (во вспышках 6 сентября 2011 г. и 6 сентября 2017 г., по дополнительным данным, были зарегистрированы потоки протонов 8 pfu и 15 pfu соответственно), в столбце 5 — длительности (в часах) потоков гамма-излучения с  $E > 100$  МэВ, в столбце 6 — максимальные значения потоков гамма-излучения  $F_{\gamma \text{ max}}$

с  $E < 100$  МэВ (кроме события 22 мая 2013 г.). При построении графиков гамма-потоков с  $E > 100$  МэВ мы использовали данные Fermi/LAT и провели обработку по методике MLP (maximum-likely plots) [Share et al., 2018]. Для изучения структуры и других характеристик KBM использовались наблюдательные данные КА SOHO/LASCO.

На основании сравнения потоков протонов с  $E > 500$  МэВ и потоков гамма-излучения с  $E > 100$  МэВ от вспышек мы выделили три различных типа событий: тип 1 — гамма-события, которые сопровождались потоками высокоэнергичных протонов вблизи Земли (события № 1–4 в таблице); тип 2 — события

с гамма-излучением с  $E > 100$  МэВ, но без усиленных потоков высокоэнергичных протонов (события № 5–8); тип 3 — события, характеризующиеся возрастанием потоков протонов достаточно высоких энергий при отсутствии гамма-излучения (событие № 9; подобные события, видимо, не относятся к гамма-вспышкам).

Событие № 9 произошло 22 мая 2013 г.: вспышка рентгеновского класса M5 (начало в 13:08 UT, N15 W70) включала КВМ типа гало с  $V = 1466$  км/с и поток протонов с  $E > 10$  МэВ интенсивностью 1660 rfu. В этой вспышке было зарегистрировано небольшое возрастание потока высокоэнергичных протонов, включая энергии более 700 МэВ, но Fermi/LAT не зарегистрировал гамма-эмиссию с  $E > 100$  МэВ. Вспышка началась в 13:08 UT, а развитие КВМ — в 12:25 UT, т. е. КВМ произошел несколько позднее импульсной фазы вспышки. Следовательно, высокоэнергичные протоны ускорились на большем расстоянии от области вспышки при относительно низкой корональной плотности.

Вспышка 7 марта 2012 г. (см. рис. 2) характеризуется значительной временной задержкой в появлении максимальных потоков протонов высоких энергий относительно максимума эмиссии вспышки в рентгеновской области спектра. Возможно, это было обусловлено положением центра вспышки по долготе (N17E15).

Каждая солнечная вспышка, сопровождавшаяся гамма-излучением, уникальна. Например, событие 6 сентября 2011 г. (X2.1, N14W18) характеризовалось только слабым возрастанием потоков протонов с энергиями  $> 10$  МэВ (8 rfu) и, соответственно, почти полным отсутствием потока высокоэнергичных протонов в наблюдениях вблизи Земли. Такая же картина наблюдалась в событии 7 сентября 2011 г. (X2.1, N18W32) с похожими характеристиками потоков протонов. Вспышка 6 сентября отсылалась к источникам гамма-излучения с  $E > 100$  МэВ с  $F_{\gamma \text{ max}}$ , который был шестым по интенсивности среди зарегистрированных, а в событии 7 сентября 2011 г. наблюдаемый максимальный поток гамма-излучения был в 35 раз меньше. В событии 23 января 2012 г. наблюдались поток гамма-квантов с  $E > 100$  МэВ и возрастание потоков протонов с энергиями 375 и 465 МэВ, но не было зарегистрировано усиления потока протонов с  $E > 500$  МэВ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

На основе существующих представлений о процессе энерговыделения в солнечных вспышках с КВМ и длительным гамма-излучением было подтверждено, что появление коронального выброса массы тесно связано по времени с импульсной фазой вспышки [Минасянц и др., 2019]. Известно, что наиболее эффективное ускорение частиц на фронтах ударных волн КВМ наблюдается, когда КВМ возникает и развивается как до, так и в максимуме импульсной фазы вспышек, что вызывает в дальнейшем появление потоков высокоэнергичного гамма-излучения с  $E > 100$  МэВ. Среди рассмотренных событий только во вспышке 6 сентября 2011 г.  $F_{\gamma}$

с  $E > 100$  МэВ на основной фазе слегка превышал  $F_{\gamma}$  на импульсной фазе. В других случаях максимальные потоки гамма-излучения регистрировались на импульсной фазе вспышечного явления (см. рис. 1). Следовательно, развитие ударных волн вследствие КВМ, которое рассматривается как доминирующий процесс ускорения протонов на основной фазе продолжительных гамма-вспышек, в некоторых случаях происходит на импульсной фазе. Кроме того, практически на всех приведенных рисунках хорошо видно, что в жестком рентгеновском диапазоне выделение энергии происходит в форме отдельных всплесков (имеются признаки подобного поведения и в гамма-излучении). Известно, что процесс выделения энергии в токовых слоях солнечных вспышек носит подобный нерегулярный характер и подвержен флуктуациям. Этот факт был подтвержден в ходе лабораторных экспериментов с токовыми слоями [Алтынцев и др., 1982]. Сравнение потоков протонов с  $E > 500$  МэВ и потоков гамма-излучения с  $E > 100$  МэВ от вспышек показало, что рассмотренные события можно отнести к трем типам: тип 1 — потоки гамма-излучения сопровождаются потоками энергичных протонов; тип 2 — гамма-излучение регистрируется при отсутствии возрастаний потоков протонов; тип 3 — во время наблюдаемых возрастаний потоков энергичных протонов не зарегистрировано потоков гамма-квантов. По-видимому, отсутствие возрастаний потоков протонов в продолжительных вспышках типа 2 связано с условиями их распространения в межпланетной среде, а события типа 3 могут быть вообще не связаны со вспышками с длительным гамма-излучением (например, вспышка 22 мая 2013 г.).

Авторы выражают благодарность коллективам ученых, курирующих проведение экспериментов на КА Fermi, SDO, GOES за экспериментальные данные, опубликованные в Интернете. В.М. Томозов выражает глубокую благодарность рецензенту за многочисленные советы и замечания, позволившие улучшить статью.

Работа поддержана Программой целевого финансирования BR05336383 Аэрокосмического комитета МОАП Республики Казахстан и финансированием в рамках Проекта П.16.3.1 Института солнечной-земной физики СО РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтынцев А.Т., Банин В.Г., Куклин Г.В., Томозов В.М. *Солнечные вспышки*. М.: Наука, 1982. 246 с.
- Лившиц М.А. Солнечные вспышки: результаты наблюдений и газодинамические процессы. *Плазменная гелиофизика*. М.: Наука, 2008. Т. 1. С. 60–81.
- Минасянц Г.С., Минасянц Т.М., Томозов В.М. Особенности развития длительных потоков высокоэнергичного гамма-излучения на разных стадиях солнечных вспышек. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 3. С. 11–20. DOI: [10.12737/szf-53201902](https://doi.org/10.12737/szf-53201902).
- Прист Э.Р., Форбс Т. *Магнитное пересоединение. Магнитогидродинамическая теория и приложения*. М.: Физматлит, 2005. 592 с.
- Golovko A.A., Kuklin G.V., Mordvinov A.V., Tomozov V.M. The role of shear motions in the production of a preflare situation. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*. 1986. Vol. 15. P. 243–250.

Gopalswamy N., Makela P., Yashiro S., et al. Interplanetary type II radio bursts from Wind/WAVES and sustained gamma-ray emission from Fermi/LAT: Evidence for shock source. *Astrophys. J. Lett.* 2018. Vol. 868, no. 2, L19. 8 p. DOI: [10.3847/2041-8213/aaef36](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaef36).

Gopalswamy N., Makela P., Yashiro S., et al. Fermi, Wind and SOHO observations of sustained gamma-ray emission from the Sun. *arXiv:1810.08958v1*. DOI: [10.48550/arXiv.1810.08958](https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.08958).

Grechnev V.V., Kiselev V.I., Kashapova L.K., Kochanov A.A., et al. Radio, hard X-ray and gamma-ray emission associated with a far-side solar event. *Solar Phys.* 2018. Vol. 293, iss. 10. id. 133, 31 p. DOI: [10.1007/s11207-018-1352-z](https://doi.org/10.1007/s11207-018-1352-z).

Manchester W., Kilpua K.J., Liu Y.D., et al. The physical processes of CME/ICME evolution. *Space Sci. Rev.* 2017. Vol. 212. P. 1159–1219. DOI: [10.1007/s11214-017-0394-0](https://doi.org/10.1007/s11214-017-0394-0).

Minasyants G.S., Minasyants T.M., Tomozov V.M. Features of development of gamma-rays in a solar flare February 25, 2014. *News National Academy RK, Phys.-Math. Ser.* 2018. Vol. 4, no. 320. P. 15–21.

Murphy R.J., Dermer C.D., Ramaty R. High-energy processes in solar flares. *Astrophys. J. Suppl.* 1987. Vol. 63. P. 721–748. DOI: [10.1086/191180](https://doi.org/10.1086/191180).

Omodei N., Pesce-Rollins M., Longo F., et al. Fermi-LAT observations of the 2017 September 10<sup>th</sup> solar flare. *Astrophys. J. Lett.* 2018. Vol. 865, no. 1. P. 1–6. DOI: [10.3847/2041-8213/aae077](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aae077).

Plotnikov I., Rouillard A.P., Share G.H. The magnetic connectivity of coronal shocks from behind-the-limb flares to the visible solar surface during  $\gamma$ -ray events. *Astronomy and Astrophysics.* 2017. Vol. 608, A43. DOI: [10.1051/0004-6361/201730804](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201730804).

Share G.H., Murphy R.J., Tolbert A.K., et al. Characteristics of sustained >100 MeV gamma-ray emission associated with solar flares. *arXiv*. 2017. 83 p. DOI: [10.48550/arXiv.1711.01511](https://doi.org/10.48550/arXiv.1711.01511).

Share G.H., Murphy R.J., White S.M., Tolbert A.K., et al. Characteristics of late-phase >100 MeV gamma-ray emission in solar eruptive events. *Astrophys. J.* 2018. Vol. 869, 182. DOI: [10.3847/1538-4357/aaebf7](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaebf7).

Somov B.V. *Plasma Astrophysics: Reconnection and Flares*. New York: Springer, 2013. 504 p.

Tylka A.J., Share G.H., William W.F., et al. Solar protons above 500 MeV in the Sun's atmosphere and in interplanetary space. *Geophys. Res. Abstracts.* 2014. Vol. 16, EGU 2014-16847.

URL: [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/UNIVERSAL\\_ver1/2017\\_09/univ2017\\_09.html](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL_ver1/2017_09/univ2017_09.html) (дата обращения 17 сентября 2023 г.).

URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/dataaccess.html> (дата обращения 17 сентября 2023 г.).

*Как цитировать эту статью:*

Томозов В.М., Минасянц Г.С., Минасянц Т.М. Солнечные вспышки с продолжительным гамма-излучением и характеристики потоков протонов высоких энергий. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 4. С. 38–43. DOI: [10.12737/szf-94202304](https://doi.org/10.12737/szf-94202304).