

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ДЛИТЕЛЬНЫХ ПОТОКОВ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

FEATURES OF DEVELOPMENT OF SUSTAINED FLUXES OF HIGH-ENERGY GAMMA-RAY EMISSION AT DIFFERENT STAGES OF SOLAR FLARES

Г.С. Минасянц

*Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова НАН РК,
Алматы, Казахстан gennadii_minasya@mail.ru*

Т.М. Минасянц

*Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова НАН РК,
Алматы, Казахстан gennadii_minasya@mail.ru*

В.М. Томозов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, tom@iszf.irk.ru*

G.S. Minasyants

*Fesenkov Astrophysical Institute,
Almaty, Kazakhstan, gennadii_minasya@mail.ru*

T.M. Minasyants

*Fesenkov Astrophysical Institute,
Almaty, Kazakhstan, gennadii_minasya@mail.ru*

V.M. Tomozov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, tom@iszf.irk.ru*

Аннотация. Рассмотрены характеристики длительных потоков гамма-излучения с энергиями квантов >100 МэВ на разных стадиях вспышечных событий. Для анализа использовались данные наблюдений с временным разрешением 1 мин на космическом аппарате Fermi с помощью Large Area Telescope (LAT).

Подтвержден наиболее вероятный процесс возникновения гамма-квантов высоких энергий на импульсной фазе вспышек (6 событий). Ускорение частиц, возникающих в результате вспышечного энерговыделения (при диссипации токового слоя), происходит при взаимодействии с фронтом ударной волны коронального выброса массы (КВМ), который одновременно развивается в той же активной области. Ядерные взаимодействия ускоренных протонов (>500 МэВ) с ионами плазмы приводят в дальнейшем к возникновению высокоэнергичных квантов гамма-излучения. Установлено, что взаимодействие вспышечного потока и высокоскоростного КВМ на импульсной фазе вспышки происходит в довольно ограниченных временных интервалах — от 2 до 16 мин. В рассмотренных событиях зарегистрирована непосредственная связь между максимальными значениями потоков гамма-излучения

$F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}^{\max}$ и скоростью КВМ.

Для импульсных фаз вспышек характерны высокие максимальные значения потоков гамма-излучения $F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}^{\max} : 3.5 \cdot 10^{-4} - 1.3 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. При этом значение $F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}^{\max} = 0.013 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ оказалось самым высоким для событий, наблюдавшихся на Fermi/LAT с 2008 по 2017 г.

В процессе эволюции КВМ, движущихся со сверхзвуковой скоростью в короне Солнца, образуются ударные волны, которые являются основными энергетическими источниками ускоренных частиц на главной стадии длительных вспышек. Однако в некоторых случаях влияние ударных волн на ускорение частиц оказывается наибольшим на кратковременной импульсной фазе вспышки.

С целью выявления параметров, которые могут оказывать наибольшее влияние на генерацию высоко-

Abstract. We have studied properties of sustained gamma fluxes having quantum energies of >100 MeV at different stages of flares with 1-min temporal resolution (Fermi/LAT).

The most probable process of emergence of high-energy gamma-quanta during the impulsive phase of flares (6 events) has been confirmed. Acceleration of particles, produced by flare energy release (at dissipation of current sheet), occurs when they interact with a shock front of a coronal mass ejection (CME), which develops in the same active region at the same time. Nuclear interactions of accelerated protons (>500 MeV) with plasma ions lead further to the emergence of high-energy gamma-quanta. We have established that the interaction between a flare flux and a high-speed CME during the flare impulsive phase occurs within fairly limited periods — from 2 to 16 min. In the events considered, we have found a direct connection between maximum gamma flux $F_{\gamma>100 \text{ MeV}}^{\max}$ and CME velocity.

High maximum values of gamma fluxes are typical of the flare impulsive phase: $3.5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \leq F_{\gamma>100 \text{ MeV}}^{\max} \leq 1.3 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. At the same time, the value $F_{\gamma>100 \text{ MeV}}^{\max} = 0.013 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ was the highest for the events observed by Fermi/LAT from 2008 to 2017.

During the development of CMEs moving with a supersonic speed, shock waves are formed which are the major power source of accelerated particles during the main phase of gradual flares. In some cases, however, the impact of shock waves on particle acceleration is the greatest in the short impulsive phase.

To reveal parameters most effectively influencing the generation of high-energy gamma-ray emission, we have compared 17 flare events. The most significant parameter proved to be the time interval of joint action of flare process and CME shocks.

We have established that during simultaneous development of flare process and CME attendant on the flare, the most efficient particle acceleration occurs which gives rise to maximum fluxes of high-energy gamma-quanta.

энергичного гамма-излучения, было проведено их сопоставление для 17 вспышечных событий. Наиболее значимым параметром оказался интервал времени совместного действия вспышечного процесса и ударных волн КВМ.

Установлено, что при одновременном развитии вспышечного процесса и сопровождающего вспышку КВМ происходит наиболее эффективное ускорение частиц, приводящее к появлению максимальных потоков высокоэнергичных гамма-квантов.

Ключевые слова: вспышки, корональные выбросы массы, ускорение частиц, гамма-излучение.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования структуры солнечных активных областей при развитии в них мощных вспышек позволили выявить наиболее вероятные источники ускорения частиц, а именно: электрические поля, плазменную и МГД-турбулентность и ударные волны. Каждый из них характеризуется временем действия, эффективностью и характерным масштабом. Одним из основных механизмов ускорения частиц на импульсной фазе вспышек считается выделение свободной магнитной энергии в активной области вследствие ее диссипации в токовых слоях из-за магнитного пересоединения с последующим действием стохастического ускорения при развитии различных плазменных неустойчивостей [Алтынцев и др., 1982; Прист, Форбс, 2005; Somov, 2013]. Данные наблюдений показали, что магнитное пересоединение происходит как в короне, так и в хромосфере Солнца [Li et al., 2017]. Вторым механизмом ускорения частиц во вспышках (особенно в протонных событиях) является ускорение на фронтах ударных волн, возникающих при распространении корональных выбросов массы (КВМ) из активных областей.

Согласно современным представлениям, возникновение вспышек и сопутствующих им выбросов плазмы тесно связано с нарушением равновесия магнитных структур активных областей в ходе их эволюции. По мере развития магнитные структуры активных областей с располагающимися на линии раздела полярностей магнитного поля волокнами непрерывно усложняются. Над волокнами располагаются замкнутые петли магнитного поля, которые создают в целом закрытую магнитную конфигурацию всей активной области вплоть до корональных высот. При непрерывном воздействии сдвиговых движений на основания магнитных петель вдоль линии раздела полярностей волокно (протуберанец) теряет устойчивость и начинает ускоренно подниматься, открывая магнитную структуру и образуя в головной части «ядро» КВМ. Позади уходящего КВМ появляется тонкая светящаяся «пуповина» горячей плазмы, образующая токовый слой [Shibata, 1998; Knizhnik et al., 2017]. Подчеркнем, что основным источником усложнения магнитной структуры считаются сдвиговые движения на линии раздела полярностей в активной области, что ранее было отмечено Головки и др. [Golovko et al., 1986]. Возможно, что именно с процессом «прорыва» вершин

Keywords: flares, coronal mass ejection, particle acceleration, gamma-ray emission.

корональных магнитных петель движущимся волчком связана импульсная фаза вспышки, поскольку в этих областях регистрируется энерговыделение и наблюдаются источники жесткого рентгеновского излучения.

Известно, что на импульсной фазе вспышки в области энерговыделения наблюдаются быстро движущиеся потоки горячей плазмы и ускоренных заряженных частиц, часть из которых по магнитным силовым трубкам распространяется в нижележащие слои солнечной атмосферы. При взаимодействии энергичных частиц с более плотной плазмой в основаниях магнитных петель генерируется тормозное рентгеновское, гамма-излучение и нагревается плазма. Быстрый нагрев плазмы в фотосфере и хромосфере приводит к ее испарению и подъему с заполнением всего объема магнитных арок. На этой фазе вспышки наблюдается наибольшее усиление мягкого рентгеновского излучения. Затем следует главная фаза вспышки, в которой нагретая плазма в системе арок длительное время излучает в мягком рентгеновском диапазоне, постепенно теряя энергию [Лившиц, 2008]. Одновременно с этим происходит взаимодействие вспышечных потоков плазмы с развивающимся КВМ. Это приводит к последующему ускорению вспышечных протонов на фронте ударной волны КВМ, а также в ударных волнах, которые образуются при движении КВМ в верхних слоях короны и в межпланетной среде. С существованием фронтов ударных волн в КВМ связано появление всплесков радиоизлучения II типа в солнечной короне и гелиосфере. Дополнительное ускорение частиц возможно также при наличии токового слоя, образованного вследствие магнитного пересоединения в области позади удаляющегося фронта КВМ [Manchester et al., 2017].

В последние годы большое внимание уделяется вспышкам с продолжительной фазой гамма-излучения, которые относятся к наиболее мощным и геоэффективным событиям. Они практически всегда сопровождаются быстрыми КВМ типа гало. Подобные вспышки изучались и ранее, в том числе и с помощью космических аппаратов (КА) КОРОНАС-Ф/СОНГ [Курт и др., 2010] и ГАММА/ГАММА1 [Akimov et al., 1991], однако при их рассмотрении недостаточное внимание уделялось роли КВМ в ускорении протонов до высоких энергий. Подробно анализировались лишь отдельные события с учетом КВМ [Grechnev et al., 2008].

Известно, что фаза вспышки с длительным гамма-излучением свидетельствует о большом количестве

ускоренных высокоэнергичных частиц — протонов и электронов, взаимодействующих с атмосферой Солнца. На возможность протекания ядерных взаимодействий в солнечной атмосфере с участием энергичных частиц в наиболее мощных вспышечных событиях, сопровождающихся гамма-излучением, указывалось сравнительно давно, особенно в протонных событиях. Согласно результатам [Murphy et al., 1987], протоны с энергиями, превышающими 300 МэВ, при взаимодействии с веществом солнечной атмосферы способны генерировать нейтральные и заряженные π -мезоны (пионы), при распаде которых возникает гамма-излучение. При ускорении вспышечных протонов до энергий $E_k > 500$ МэВ нейтральные пионы становятся источниками излучения гамма-квантов высоких энергий (>100 МэВ), регистрируемого приборами КА.

Ударные волны при КВМ считаются основными источниками ускоренных солнечных протонов до энергий >500 МэВ при их распространении как в короне Солнца, так и в межпланетной среде [Тулка et al., 2014]. Grechnev et al. [2008] подчеркнули, что при изучении характеристик продолжительных событий очень важным является выяснение относительного вклада ускорения частиц во вспышках и на фронтах ударных волн КВМ. Этот вклад может различаться для разных событий, на различных этапах их развития и в разных энергетических диапазонах. Gopalswamy et al. [2018, 2019] выявили связь между характеристиками радиовсплесков II типа и вспышками с длительным гамма-излучением, что свидетельствует о большой роли ударных волн КВМ в ускорении протонов до высоких энергий на больших расстояниях в короне и гелиосфере.

Недавно был представлен и проанализирован обширный наблюдательный материал по 30 вспышкам с длительной фазой гамма-излучения, полученный с помощью Large Area Telescope (LAT) КА Fermi в период с 2008 по 2017 г. [Share et al., 2017a, b]. В этих работах период времени с излучением гамма-квантов высоких энергий >100 МэВ было предложено называть второй устойчивой стадией эмиссии при развитии мощных вспышек; первая стадия — это излучение на импульсной фазе вспышки. В подобных событиях длительность импульсной фазы составляла менее 20 мин, в то время как основная фаза могла продолжаться несколько часов.

Благодаря применению новой методики, Share et al. [2017a, b] на основе исходных наблюдательных данных потоков гамма-излучения $F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}$ удалось получить их значения с лучшим временным разрешением (1 мин) и с оценками статистических ошибок.

В нашей работе проанализирован ряд событий из каталога [Share et al., 2017a, b] с целью выявления особенностей развития импульсной фазы некоторых вспышек с длительным гамма-излучением. Было выявлено 6 событий, в которых наблюдалось излучение гамма-квантов с энергиями >100 МэВ на импульсной фазе вспышки (раздел 1). Основное внимание уделено сопоставлению максимальных значений потоков гамма-излучения $F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}^{\text{max}}$ с параметрами, которые могут реально влиять на

значения потоков как на импульсной, так и на главной фазе вспышки и КВМ (раздел 2).

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗВИТИЯ ПОТОКОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ИМПУЛЬСНОЙ ФАЗЕ ВСПЫШКИ

Ниже представлены результаты анализа особенностей эволюции потоков гамма-излучения с энергией >100 МэВ на импульсных фазах шести вспышечных событий.

Как уже отмечалось, на импульсной фазе вспышки наблюдаются яркие участки стекающей вниз плазмы из областей диссипирующих токовых слоев в короне. На фотогелиограммах КА SDO в линии $\lambda 1700 \text{ \AA}$ (изображения верхней фотосферы и области температурного минимума в ультрафиолетовом диапазоне спектра) с хорошим пространственным разрешением отчетливо отражаются основные особенности этого процесса. С помощью специально разработанной программы нами была проведена фотометрическая обработка этих снимков и получен временной профиль изменения относительной интенсивности ΔI линии 1700 \AA фотосферной вспышечной плазмы (рис. 1, 2). Интенсивность предвспышечной невозмущенной фотосферы принималась за 1.00. Временное разрешение для отдельных серий измерений составляло ~ 50 с.

Изменение интенсивности свечения яркой плазмы на уровне фотосферы в линии 1700 \AA является индекс

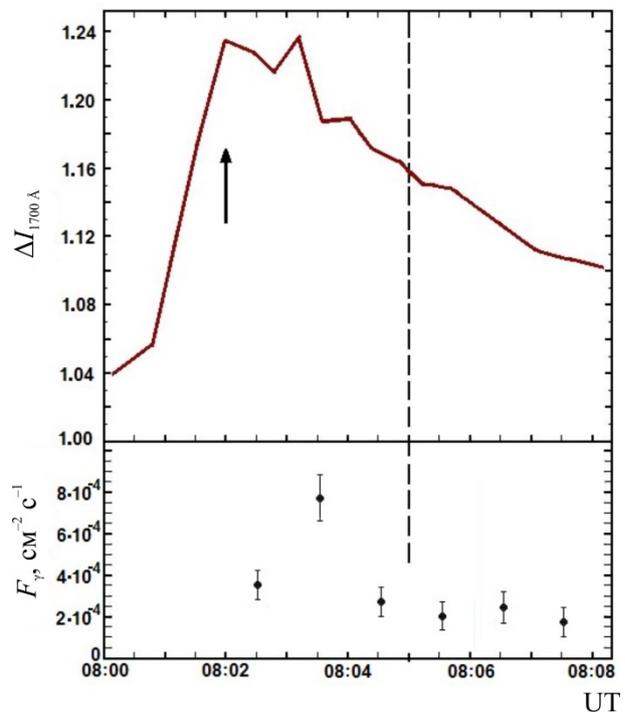


Рис. 1. Изменение относительной интенсивности фотосферной яркой эмиссии (вверху) и потока гамма-квантов с энергиями >100 МэВ (внизу) во время вспышки 9 августа 2011 г. балла X6.9 (N14, W69). Продолжительность импульсной фазы вспышки — 08:00–08:05 UT. Конец импульсной фазы указан на рисунке вертикальной штриховой линией. Вертикальная стрелка отмечает момент начала развития КВМ — 08:02 UT

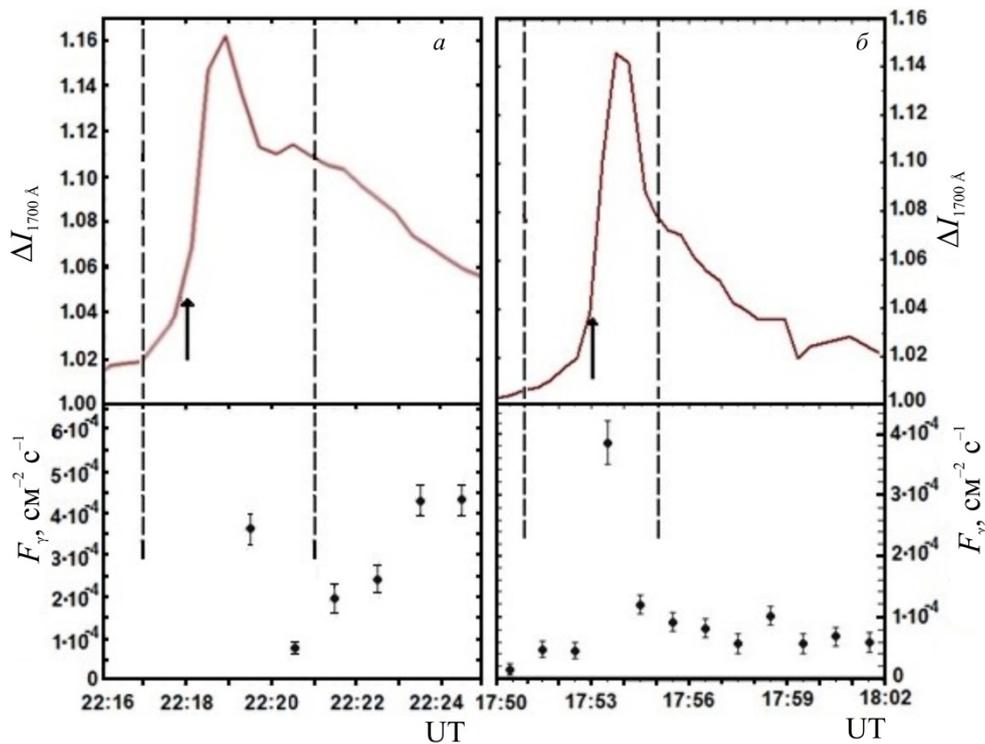


Рис. 2. Изменение относительной интенсивности фотосферной яркой вспышечной эмиссии (вверху) и потока гамма-квантов с энергией >100 МэВ (внизу) в событиях 6 сентября 2011 г. (N13 W18) балла X2.1 (а) и 3 июня 2012 г. (N15 E38) балла M3.3 (б). Импульсная фаза вспышки: а — 22:17–22:21 UT; б — 17:51–17:55 UT. Начало развития КВМ (вертикальная стрелка): а — 22:18 UT; б — 17:53 UT. Вертикальные штриховые линии отмечают временные границы импульсной фазы вспышки

Таблица 1

Характеристики рассматриваемых событий по наблюдениям на различных космических аппаратах

Дата вспышки	Балл X-ray, координаты вспышки	Время (UT) начала и конца импульсной фазы	Время (UT) начала КВМ, V, км/с	Энергия жесткого X-ray, кэВ	$F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}^{\text{max}}$ $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$
1	2	3	4	5	6
09.08.2011	X6.9 N16W70	08:00–08:05	08:02, 1610	800–7000	$7.7 \cdot 10^{-4}$
06.09.2011	X2.1 N14W18	22:17–22:21	22:18, 1000	300–1000	$3.5 \cdot 10^{-4}$
03.06.2012	M3.3 N15W38	17:51–17:55	17:53, 892	300–1000	$3.8 \cdot 10^{-4}$
11.10.2013	M1.9 N21E101	07:08–07:24	07:08, 1200	–	$4.7 \cdot 10^{-4}$
01.09.2014	X2.1 N14E126	10:57–11:13	10:57, 2000	310–1180	$4.8 \cdot 10^{-3}$
10.09.2017	X8.2 S08W88	15:50–16:06	15:51, 3163	500–2000	$1.3 \cdot 10^{-2}$

сом, который хорошо характеризует непосредственное воздействие энергичных частиц вспышек, приводящее к возникновению жесткого рентгеновского излучения и потоков гамма-квантов небольших энергий [Minasyants et al., 2018].

Конец импульсной фазы вспышки (табл. 1, столбец 3) определяется моментом времени, когда производная изменения потока dF_X/dt рентгеновского излучения в области (1–8) Å становится равна нулю при переходе от роста к падению на графике рентгеновской эмиссии (рис. 3). Далее, при отрицательных значениях dF_X/dt начинается развитие главной фазы эмиссии вспышки. Интервал времени между максимумом производной потока излучения dF_X/dt и началом главной фазы принято считать взрывной стадией импульсной фазы. Предполагается, что в этот период вспышечная плазма, находящаяся на

уровне фотосферы и хромосферы, начинает быстро подниматься вверх и заполнять весь объем корональных арок, приводя к их максимальному свечению.

Начальные моменты развития (табл. 1, столбец 4) КВМ, представленные в каталоге SOHO/LASCO, были уточнены с помощью фильтрограмм КА SDO/AIA [Share et al., 2017a].

Ускоренные в процессе диссипации энергии токового слоя электроны являются источниками тормозного излучения в интервале энергий квантов от 300 кэВ до 7 МэВ (согласно наблюдениям на КА RHESSI и Fermi/GBM). Эти значения энергии являются типичными для импульсных фаз вспышек различной мощности. Для события 11 октября 2013 г. соответствующие данные отсутствуют из-за нахождения активной области за восточным лимбом.

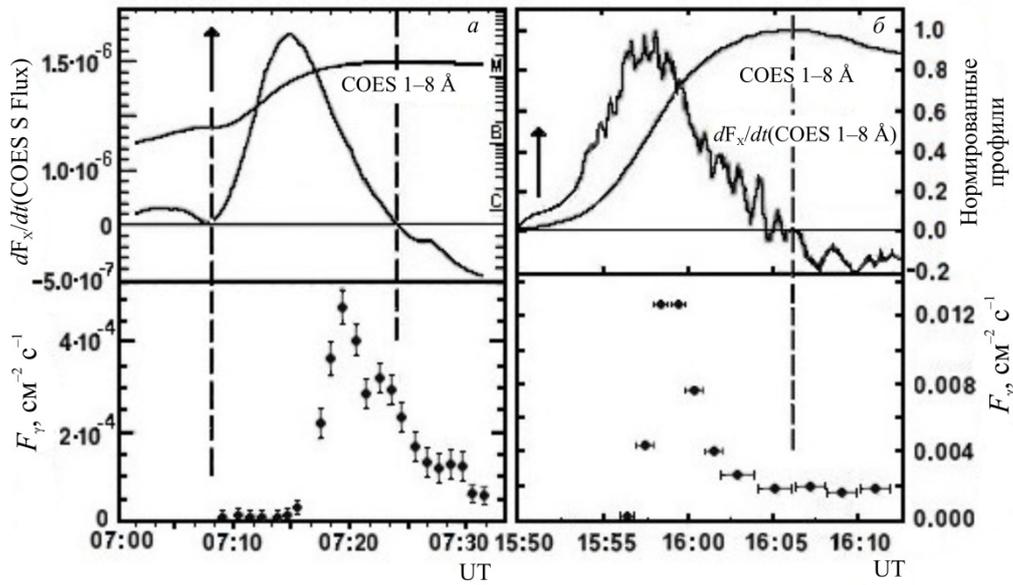


Рис. 3. События 11 октября 2013 г. (N21, E101) балла M1.9 (а) и 10 сентября 2017 г. (S08, W88) балла X8.2 (б). Импульсная фаза вспышки: а — 07:08–07:24 UT; б — 15:50–16:06 UT. Начало развития KBM (вертикальная стрелка): а — 07:08 UT; б — 15:51 UT. Вертикальные штриховые линии отмечают временные границы импульсной фазы вспышки. Верхняя часть рисунка — поток рентгеновского излучения в диапазоне 1–8 Å и его производная по времени dF_X/dt (нормированные кривые); нижняя — поток гамма-квантов с энергиями >100 МэВ

Для исследуемых событий на импульсной фазе вспышки было проведено сопоставление моментов начала развития KBM, наступления максимума в изменениях относительной интенсивности вспышечной фотосферной эмиссии и усиления потока гамма-квантов с энергиями >100 МэВ. Использовались данные наблюдений гамма-излучения КА Fermi с одноминутным разрешением, представленные в работах [Share et al., 2017a, b; Omodei et al., 2018].

Особенностью развития события 9 августа 2011 г. является то, что возникновение KBM (в 08:02 UT) совпало с началом максимума импульсной фазы вспышечного процесса, приводящего к ускорению частиц и нагреву плазмы при диссипации токовых слоев — областей магнитного пересоединения в структуре активной области. Во временные рамки импульсной фазы вспышки попало влияние как магнитного пересоединения, так и дополнительного ускорения протонов на ударном фронте KBM (типичный процесс на главной фазе длительных протонных событий). Подобная особенность развития характерна и для остальных рассмотренных событий, представленных на рисунках ниже.

Поскольку активная область, породившая вспышку 11 октября 2013 г., находилась на гелиодолготе E101 за видимым восточным краем Солнца, не было возможности построить временной профиль относительной интенсивности яркой эмиссии фотосферы в период развития вспышки. Поэтому на рис. 3 представлены кривая развития рентгеновского излучения в области (1–8) Å и ее производная по времени dF_X/dt (данные КА SDO), нулевое значение которой определяет границу между импульсной и главной фазой вспышечного события. Как было показано ранее [Minasyants et al., 2018], производная потока рентгеновского излучения на импульсной фазе коррелирует с относительной интенсивностью вспышечной плазмы на уровне фотосферы λ 1700 Å.

Для события 11 октября 2013 г. из-за более продолжительного взаимодействия KBM со вспышечным потоком можно было наблюдать изменения $F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}$ со временем более детально.

В работе [Omodei et al., 2018] для события 10 сентября 2017 г. были сопоставлены изменения со временем потока гамма-квантов с энергиями >100 МэВ и спектрального индекса протонов. Наблюдаемое совпадение поведения этих параметров подтверждает основную роль протонов в процессе образования высокоэнергичного гамма-излучения на импульсной фазе вспышки.

Очень высокая скорость движения фронта ударной волны KBM 10 сентября 2017 г., несомненно, повлияла на величину потока гамма-излучения. Было зарегистрировано усиление потока $F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}$ почти на два порядка по сравнению с остальными событиями (табл. 1, столбец 6). При этом значение потока $F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}^{\text{max}} = 0.013 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ оказалось максимальным для всего периода наблюдений Солнца на телескопе Fermi/LAT.

Особенностью события 1 сентября 2014 г. (рис. 4) является расположение активной области в пределах 40° за восточным лимбом Солнца. Данные о развитии вспышки и KBM получены с помощью КА, которые вели наблюдения этой области за лимбом. Профиль потока мягкого рентгеновского излучения, а также рентгеновский балл вспышки (по методике GOES) были определены по наблюдениям на приборе SAX КА MESSENGER. Время начала эмиссии вспышки определено и ее дальнейшее развитие описано с использованием фильтрограмм λ 195 Å КА STEREO. Данные по рентгеновскому излучению в интервале энергий 20–1180 кэВ

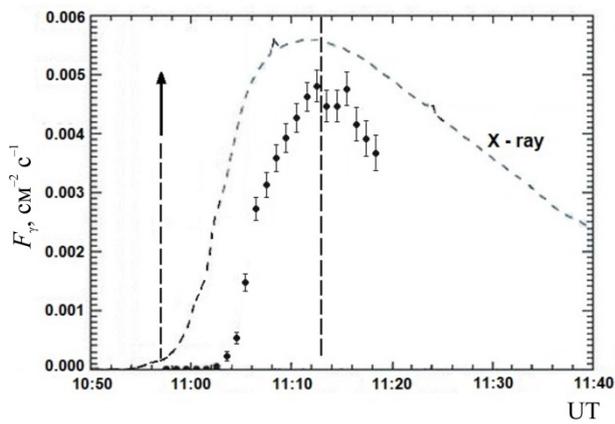


Рис. 4. Вариации мягкого рентгеновского излучения и потока гамма-квантов с энергиями >100 МэВ в событии 1 сентября 2014 г. балла X2.1 (N14 E126). Импульсная фаза вспышки — 10:57–11:13 UT. Начало развития КВМ (вертикальная стрелка) — 10:57 UT. Вертикальные штриховые линии отмечают границы импульсной фазы вспышки

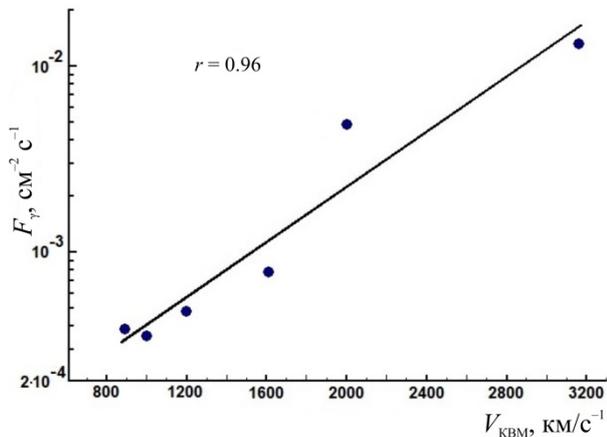


Рис. 5. Сопоставление максимальных значений потоков гамма-излучения $F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}^{\text{max}}$ и линейной скорости КВМ, сопровождавших развитие вспышек при наблюдениях с разрешением 1 мин на инструменте LAT за весь период работы телескопа Fermi

были получены на КА WIND/KONUS совместно с Fermi/GBM [Ackermann et al., 2017].

Проведено сопоставление максимальных значений потоков гамма-излучения $F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}^{\text{max}}$ на импульсных фазах вспышек со скоростями КВМ при их совместном развитии (рис. 5). Рассчитанный коэффициент корреляции по Пирсону $r = 0.96$.

Определены интервалы времени между началом развития КВМ в активной области и началом импульсной фазы вспышки. В большинстве случаев возникновению КВМ предшествовало начало импульсной фазы вспышки. Примечательно, что для шести событий, в которых регистрировался поток гамма-излучения с энергиями >100 МэВ в начале импульсной фазы вспышки, этот интервал (в минутах) составлял +2, +1, +2, 0, 0, +1.

Всего в трех событиях: 7 марта 2012 г., 25 февраля 2014 г. и 6 сентября 2011 г. — были зарегистрированы максимальные потоки гамма-излучения $F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}^{\text{max}}$ на главной фазе вспышки в пределах значений, характерных для импульсной фазы рассматри-

ваемой вспышки. Сопоставление результатов проводилось для 30 событий с $F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}$ по наблюдениям с разрешением 1 мин на инструменте LAT за весь период работы телескопа Fermi. В остальных событиях наблюдались более низкие максимальные значения потоков гамма-излучения $F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}^{\text{max}}$ на главной фазе вспышки.

2. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА МАКСИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПОТОКОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ >100 МЭВ ПРИ РАЗВИТИИ ВСПЫШЕК

Были представлены профили с минутным разрешением в периоды максимального развития потоков гамма-излучения >100 МэВ (КА Fermi) [Share et al., 2017a, b] для 17 из 32 вспышечных событий. С использованием этих данных было проведено сопоставление максимальных значений потоков гамма-излучения с параметрами, которые могут оказать влияние на величину $F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}^{\text{max}}$ как на импульсной, так и на главной фазе развития вспышечного процесса.

В столбце 3 табл. 2 приведены, согласно классификации GOES, рентгеновские баллы вспышек, времена их начала и конца. По определению, времени окончания рентгеновской вспышки GOES считается время, когда величина потока излучения между максимальным значением и уровнем фона перед вспышкой уменьшается в два раза.

Максимальные значения потоков гамма-излучения $F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}^{\text{max}}$ и времена их регистрации показаны в столбцах 4 и 5 соответственно. Определялась также разница во времени между моментом регистрации $F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}^{\text{max}}$ и временем окончания вспышки по рентгеновскому излучению (GOES) для каждого события (столбец 7).

В результате изучения взаимодействий КВМ, вспышечных процессов и ударных волн, которые сопровождалась генерацией высокоэнергичного гамма-излучения с энергиями квантов выше 100 МэВ, появилась возможность оценить эффективность этих взаимодействий при развитии активных процессов.

На рис. 6 выделяются две различные группы значений: верхняя (красные кружки) — события с более высокими величинами $F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}^{\text{max}}$ и крутыми возрастаниями потоков с ростом скорости КВМ — и нижняя (черные кружки), с противоположными характеристиками. Отметим, что при этом в большинстве событий линейные скорости КВМ в обеих группах имеют близкие значения. Это обстоятельство указывает на существование параметра, эффективно влияющего на рост потока гамма-излучения.

Развитие вспышек с рентгеновскими баллами от M1 до X3 также не показывает определяющей роли этого параметра при развитии потоков гамма-излучения.

Таблица 2

Характеристики рассматриваемых вспышечных событий $F_{\gamma > 100 \text{ МэВ}}$

N	Дата, координаты	Балл X-ray, моменты начала и конца (GOES)	$F_{\gamma > 100 \text{ МэВ}}^{\text{max}}$, $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	Время $F_{\gamma > 100 \text{ МэВ}}^{\text{max}}$	Скорость КВМ V, км/с	Δt , мин
1	2	3	4	5	6	7
1	07.06.2011, S21W54	M2.5, 06:16–06:59	$5.5 \cdot 10^{-5}$	08:02	1255	01:03
2	04.08.2011, N19W46	M9.3, 03:41–04:04	$4.3 \cdot 10^{-5}$	05:05	1315	01:01
3	09.08.2011, N16W70	X6.9, 07:48–08:08	$7.7 \cdot 10^{-4}$	08:03	1610	-00:05
4	06.09.2011, N14W18	X2.1, 22:12–22:24	$5.7 \cdot 10^{-4}$	22:27	1000	00:03
5	07.09.2011, N18W32	X1.8, 22:32–22:44	$1.6 \cdot 10^{-5}$	23:37	792	00:53
6	27.01.2012, N35W81	X1.7, 17:37–18:56	$4.5 \cdot 10^{-5}$	19:48	2508	00:52
7	17.05.2012, N05W77	M5.1, 01:25–02:14	$2.6 \cdot 10^{-5}$	02:38	1582	00:24
8	03.06.2012, N15E38	M3.3, 17:48–17:57	$3.8 \cdot 10^{-4}$	17:54	892	-00:03
9	06.07.2012, S17W52	X1.1, 23:01–23:14	$6.9 \cdot 10^{-5}$	23:26	1828	00:12
10	11.04.2013, N07E13	M6.5, 06:55–07:29	$1.7 \cdot 10^{-4}$	07:13	861	-00:16
11	13.05.2013, N10E80	X2.8, 15:48–16:16	$3.8 \cdot 10^{-5}$	17:42	1850	01:26
12	11.10.2013, N21E103	M4.9, 07:01–07:45	$4.7 \cdot 10^{-4}$	07:19	1200	-00:26
13	25.10.2013, S08E71	X1.7, 07:53–08:09	$2.5 \cdot 10^{-5}$	08:17	587	00:08
14	28.10.2013, S14E28	M4.4, 15:07–15:21	$2.5 \cdot 10^{-5}$	15:45	812	00:24
15	25.02.2014, N00E78	X4.9, 00:39–01:03	$1.5 \cdot 10^{-3}$	01:22	2147	00:19
16	01.09.2014, N14E126	X2.1, 10:58–11:34	$4.8 \cdot 10^{-3}$	11:12	2000	-00:22
17	10.09.2017, S08W88	X8.2, 15:35–16:31	$1.3 \cdot 10^{-2}$	15:58	3163	-00:33

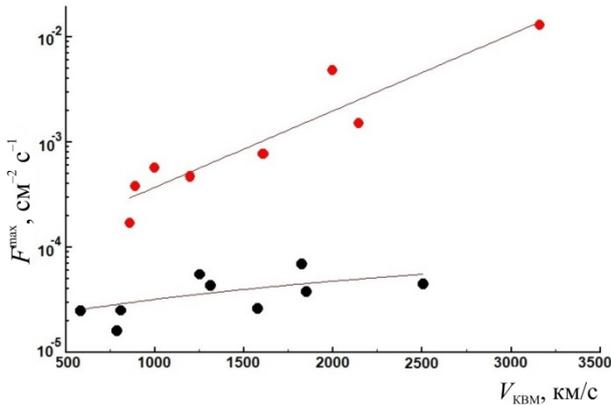


Рис. 6. Сопоставление максимальных значений потоков гамма-излучения >100 МэВ и линейной скорости КВМ для 17 вспышечных событий

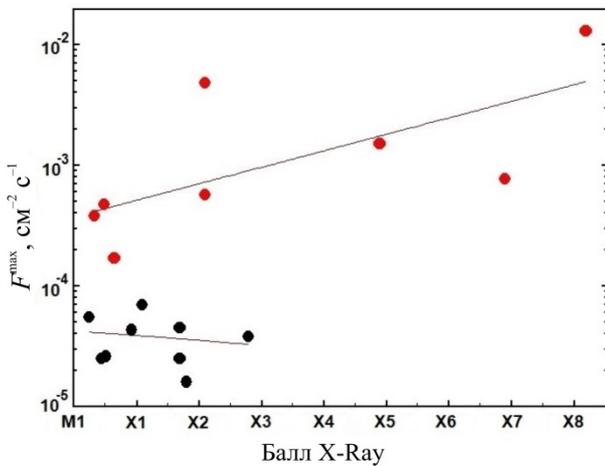


Рис. 7. Сопоставление максимальных значений потоков гамма-излучения с энергией >100 МэВ и рентгеновских баллов вспышек GOES для 17 событий

Из сопоставления рис. 6 и 7 следует, что высоким значениям $F_{\gamma > 100 \text{ МэВ}}^{\text{max}}$ (красные кружки) соответствуют невысокие скорости КВМ и небольшие рентгеновские баллы вспышек (черные кружки).

При этом наглядно проявляется влияние временного расположения максимальных значений гамма-потоков по отношению к окончанию рентгеновской вспышки. Вертикальная штриховая линия на рис. 8 разделяет группы с высокими (красные кружки) и с более низкими (черные кружки) максимальными значениями потоков гамма-излучения >100 МэВ. Лишь одно событие 25 февраля 2014 г. не соответствует общей картине. В этом событии ослабленное влияние вспышки (с рентгеновским баллом X4.9), по-видимому, было скомпенсировано вкладом высокоскоростного фронта ударной волны КВМ ($V_{\text{КВМ}}=2147 \text{ км/с}$) и совместное действие вспышки и КВМ привело к повышенному значению потока $F_{\gamma > 100 \text{ МэВ}}^{\text{max}}$.

Для каждой группы событий можно определить средние значения интервала времени Δt между моментами максимальных значений потоков гамма-излучения и временем окончания рентгеновской вспышки: -10 мин (1-я группа) и +43 мин (2-я группа). Таким образом, наиболее эффективное ускорение частиц на фронте ударной волны КВМ наблюдается в период совместного развития вспышки и КВМ.

Приведем наглядный пример влияния интервала Δt на значения $F_{\gamma > 100 \text{ МэВ}}^{\text{max}}$:

- вспышка 27 января 2012 г.: $V=2508 \text{ км/с}$, X1.7, $\Delta t=+52 \text{ мин}$, $F_{\gamma > 100 \text{ МэВ}}^{\text{max}} = 4.5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$;

- вспышка 11 октября 2013 г.: $V=1200$ км/с, M4.9, $\Delta t=-26$ мин, $F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}^{\max}=4.7 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Таким образом, обнаружено существование двух отдельных групп значений $F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}^{\max}$ (рис. 6). Каждая группа объединяет события, различные по эффективности взаимодействия вспыхивающих частиц с ударными волнами КВМ.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе анализируется эволюция длительных потоков гамма-излучения на различных стадиях вспыхивающего процесса по данным наблюдений на Fermi/LAT с разрешением 1 мин [Share et al., 2017a, b].

Основное внимание уделено выяснению различных закономерностей взаимодействия вспыхивающих процессов с КВМ. Установлено, что время возникновения КВМ тесно связано с развитием импульсной фазы вспышек. Наиболее эффективное ускорение частиц на фронте ударной волны КВМ, приводящее в дальнейшем к образованию высокоэнергичного гамма-излучения с энергиями > 100 МэВ, наблюдается в тех случаях, когда возникновение и развитие выброса происходит непосредственно перед импульсной фазой вспышки или на этой фазе. Из рассмотренных шести событий лишь для вспышки 6 сентября 2011 г. максимальное значение

$F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}$ на импульсной фазе было немного ниже, чем на главной фазе вспышки. В остальных случаях значения $F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}^{\max}$ на импульсной фазе были максимальными для всего вспыхивающего события (см. рис. 1–4).

Отметим интересную особенность: взаимодействие вспыхивающего потока на импульсной фазе вспышки и скоростного КВМ происходило в довольно ограниченном интервале времени — от 2 до 16 мин. В рассмотренных событиях была зарегистрирована прямая связь между максимальной величиной $F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}$ и скоростью КВМ.

Как правило, в процессе развития КВМ с образованием ударных волн ускорение энергичных частиц происходит на главной фазе длительной гамма-вспышки. Однако в некоторых случаях ускорение энергичных частиц на фронте ударной волны КВМ происходит именно на кратковременной импульсной фазе вспышки.

Для 17 событий проведено сопоставление максимальных значений $F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}^{\max}$ с различными физическими параметрами с целью выявления наиболее значимых из них в процессе образования гамма-квантов с энергиями >100 МэВ.

Возможно, что наиболее эффективное ускорение частиц происходит в период одновременного развития вспышки и КВМ. Каждое из восьми событий с максимальным значением потока гамма-излучения $F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}^{\max}$ от $1.7 \cdot 10^{-4}$ до $1.3 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ характеризуется наличием интервала одновременного развития вспыхивающего процесса и сопровождающего

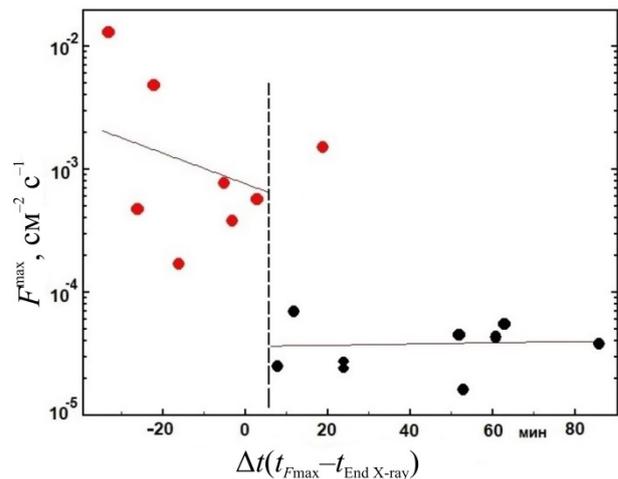


Рис. 8. Максимальные значения потоков гамма-излучения >100 МэВ для каждого из 17 событий при сопоставлении с разницей во времени между достижением $F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}^{\max}$ и окончанием рентгеновской вспышки по GOES

вспышку КВМ с ударной волной (рис. 8), что особенно заметно на фоне более низких значений $F_{\gamma>100 \text{ МэВ}}^{\max} < 7 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, наблюдавшихся в интервалы времени более 20 мин после окончания рентгеновской вспышки при близких скоростях КВМ и рентгеновских баллах вспышек. Понижение потоков гамма-излучения за пределами интервала совместного действия вспыхивающих процессов и КВМ, вероятно, связано с тем, что ускорение протонов происходит в основном на фронте ударной волны КВМ.

Таким образом, во время продолжительных событий с высокоэнергичным гамма-излучением наиболее эффективное ускорение частиц (с энергией протонов $E_k > 500$ МэВ) происходит, по-видимому, при практически одновременном развитии вспышки и ударной волны КВМ.

Авторы выражают благодарность коллективам ученых, курирующих эксперименты на КА Fermi, SDO, GOES, SOHO, RHESSI, STEREO, MESSENGER, WIND/KONUS, за предоставление экспериментальных данных, опубликованных в Интернете.

Работа выполнена в рамках программы целевого финансирования BR05336383 Аэрокосмического комитета МОАП Республики Казахстан и программы ФНИ П.16 (проект П.16.3.1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алтынцев А.Т., Банин В.Г., Куклин Г.В., Томозов В.М. Солнечные вспышки. М.: Наука, 1982. 246 с.
 Курт В.Г., Юшков Б.Ю., Кудела К., Галкин В.И. Высокоэнергичное гамма-излучение солнечных вспышек как индикатор ускорения частиц высоких энергий // 31-я Всероссийская конференция по космическим лучам. Москва, МГУ, 2010. С. 1–5.
 Лившиц М.А. Солнечные вспышки: результаты наблюдений и газодинамические процессы // Плазменная гелиогеофизика: в 2-х т. М.: Наука, 2008. Т. 1. С. 60–81.
 Прист Э.Р., Форбс Т. Магнитное пересоединение. Магнитогиродинамическая теория и приложения. М.: Физматлит, 2005. 591 с.

Ackermann M., Allafort A., Baldini L., et al. Fermi-LAT observations of high-energy behind-the-limb solar flares // arXiv:1702.00577v1 [astro-ph.SR] 2 Feb 2017. 14 p.

Akimov V.V., Afanassyev V.G., Belousov A.S., et al. Observation of high energy gamma rays from the Sun with the GAMMA-1 telescope ($E > 30$ MeV) // Proc. 22nd ICRC. 1991. V. 3. P. 73–76.

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 Skalnat Pleso. 1986. V. 15. P. 243–250.

Gopalswamy N., Mäkelä 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. V. 868, L19. 8 p. DOI: [10.3847/2041-8213/aaef36](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaef36).

Gopalswamy N., Mäkelä P., Yashiro S., et al. Fermi, Wind and SOHO observations of sustained gamma-ray emission from the Sun // URSI AP-RASC 2019, New Delhi, India, 09–15 March 2019. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1810/1810.08958.pdf> (дата обращения 01.04.2019).

Grechnev V.V., Kurt V.G., Chertok I.M., et al. An extreme solar event of 20 January 2005: properties of the flare and the origin of energetic particles // Solar Phys. 2008. V. 252. P. 149–177. DOI: [10.1007/s11207-008-9245-1](https://doi.org/10.1007/s11207-008-9245-1).

Knizhnik K.J., Antiochos S.K., DeVore C.R., Wyper P.F. The mechanism for the energy buildup driving solar eruptive events. // Astrophys. J. Lett. 2017. V. 851, L17. 6 p. DOI: [10.3847/2041-8213/aa9e0a](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa9e0a).

Li Y., Sun X., Ding M.D., et al. Imaging observations of magnetic reconnection in a solar eruptive flare // Astrophys. J. 2017. V. 835, N 190. 8 p. DOI: [10.3847/1538-4357/835/2/190](https://doi.org/10.3847/1538-4357/835/2/190).

Manchester W., Kilpua K.J., Liu Y.D., et al. The physical processes of CME/ICME evolution // Space Sci. Rev. 2017. V. 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 the development of gamma-rays in a solar flare February 25, 2014 // News National Academy RK, Phys.-Math. Ser. 2018. V. 4, N 320. P. 15–21.

Murphy R.J., Dermer C.D., Ramaty R. High-energy processes in solar flares // Astrophys. J. Suppl. 1987. V. 63. P. 721–748.

Omodei N., Pesce-Rollins M., Longo F., et al. Fermi-LAT observations of the 2017 September 10th solar flare // arXiv:1803.07654v1 [astro-ph.HE]. 2018. 6 p.

Share G.H., Murphy R.J., Tolbert A.K., et al. Characteristics of sustained >100 MeV gamma-ray emission associated with solar flares // arXiv:1711.01511v1 [astro-ph.SR]. 2017a. 83 p.

Share G.H., Murphy R.J., Tolbert A. K., et al. Characteristics of thirty second-stage >100 MeV γ -ray events accompanying solar flares // ApJS in review, arXiv 1711.01511v1. 2017b. 34 p.

Shibata K. Reconnection model of flares. Solar physics with radio observations // Proc. of Nobeyama Symposium. 1998. P. 381–389. (NRO Report N 479).

Somov B.V. Plasma Astrophysics: Reconnection and Flares. New York: Springer, 2013. 504 p. DOI: [10.1016/S0273-1177\(97\)00968-X](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00968-X).

Tylka A.J., Share G.H., Dietrich W.F., et al. Solar protons above 500 MeV in the Sun's atmosphere and in interplanetary space // Report EGU General Assembly, Vienna, Austria 27 April — 02 May 2014. Geophysical Research Abstracts. 2014. V. 16, EGU2014–16847, 41 p.

REFERENCES

Ackermann M., Allafort A., Baldini L., Barbiellini G., Bastieri D., Bellazzini R., et al. Fermi-LAT observations of high-energy behind-the-limb solar flares. arXiv:1702.00577v1 [astro-ph.SR] 2 Feb 2017. 14 p.

Akimov V.V., Afanassyev V.G., Belousov A.S., Blokhintsev I.D., Kalinkin L.F., Leikov N.G., et al. Observation of high energy gamma-rays from the Sun with the GAMMA-1 telescope ($E > 30$ MeV). Proc. 22nd ICRC. 1991, vol. 3, pp. 73–76.

Altyntsev A.T., Banin V.G., Kuklin G.V., Tomozov V.M. Solnechnye vspyski [Solar Flares]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 246 p. (In Russian).

Kurt V.G., Yushkov B.Yu., Kudela K., Galkin V.I. High-energy gamma emission of solar flares as an indicator of acceleration of high-energy particles. Proc. 31st National Conference on Cosmic Rays. Moscow, MSU, 2010, pp. 1–5. (In Russian).

Livshits M.A. Solar flares: observation results and gas-dynamic processes. Plazmennaya geliofizika [Plasma Heliophysics]. Moscow, Nauka Publ., 2008, vol. 1, pp. 60–81. (In Russian).

Priest E.R., Forbes T. Magnitoe peresodinenie. Magnitogidrodinamicheskaya teoriya i prilozheniya [Magnetic Reconnection. Magnetohydrodynamic Theory and Applications]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 591 p. (In Russian).

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 Skalnat Pleso. 1986, vol. 15, pp. 243–250.

Gopalswamy N., Mäkelä P., Yashiro S., Lara A., Xie H., Akiyama S., MacDowall R.J. 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, L19, 8 p. DOI: [10.3847/2041-8213/aaef36](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaef36).

Gopalswamy N., Mäkelä P., Yashiro S., Lara A., Xie H., Akiyama S., MacDowall R.J. Fermi, Wind and SOHO observations of sustained gamma-ray emission from the Sun. URSI AP-RASC 2019, New Delhi, India, 09–15 March 2019. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1810/1810.08958.pdf> (accessed 01.04.2019).

Grechnev V.V., Kurt V.G., Chertok I.M., Uralov A.M., Nakajima H., Altyntsev A.T., Belov A.V., Yushkov B.Yu., Kuznetsov S.N., Kashapova L.K., Meshalkina N.S., Prestage N.P. An extreme solar event of 20 January 2005: properties of the flare and the origin of energetic particles. Solar Phys. 2008, vol. 252, pp.149–177. DOI: [10.1007/s11207-008-9245-1](https://doi.org/10.1007/s11207-008-9245-1).

Knizhnik K.J., Antiochos S.K., DeVore C.R., Wyper P.F. The mechanism for the energy buildup driving solar eruptive events. Astrophys. J. Lett. 2017, vol. 851, L17, 6 p. DOI: [10.3847/2041-8213/aa9e0a](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa9e0a).

Li Y., Sun X., Ding M.D., Qiu J., Priest E.R. Imaging observations of magnetic reconnection in a solar eruptive flare. Astrophys. J. 2017, vol. 835, 190, 8 p. DOI: [10.3847/1538-4357/835/2/190.1](https://doi.org/10.3847/1538-4357/835/2/190.1).

Manchester W., Kilpua K.J., Liu Y.D., Lugaz N., Riley P., Török T., Vršnak B. The physical processes of CME/ICME evolution. Space Sci. Rev. 2017, vol. 212, pp. 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 the development of gamma-rays in a solar flare February 25, 2014. News National Academy RK, Phys.-Math. Ser. 2018, vol. 4, no. 320, pp. 15–21.

Murphy R.J., Dermer C.D., Ramaty R. High-energy processes in solar flares. Astrophys. J. Suppl. 1987, vol. 63, pp. 721–748.

Omodei N., Pesce-Rollins M., Longo F., Allafort A., Krucker S. Fermi-LAT observations of the 2017 September 10th solar flare. arXiv: 1803.07654v1 [astro-ph.HE]. 2018, 6 p.

Share G.H., Murphy R.J., Tolbert A.K., Dennis B.R., White S.M., Schwartz R.A., Tylka A.J. Characteristics of sustained >100 MeV ray-emission associated with solar flares. arXiv:1711.01511v1 [astro-ph.SR]. 2017a, 83 p.

Share G.H., Murphy R.J., Tolbert A.K., Dennis B.R., White S.M., Schwartz R.A., Tylka A.J. Characteristics of thirty second-stage >100 MeV γ -ray events accompanying solar flares. ApJS in review, arXiv 1711.01511v1. 2017b, 34 p.

Shibata K. Reconnection model of flares. Solar physics with radio observations. *Proc. of Nobeyama Symposium*. 1998, pp. 381–389. (NRO Report N 479).

Somov B.V. *Plasma Astrophysics: Reconnection and Flares*. New York, Springer, 2013, 504 p. DOI: [10.1016/S02731177\(97\)00968-X](https://doi.org/10.1016/S02731177(97)00968-X).

Tylka A.J., Share G.H., Dietrich W.F., Murphy R.J., Ng C.K., Shea M.A., Smart D.F. Solar protons above 500 MeV in the Sun's atmosphere and in interplanetary space. *Report EGU General Assembly*, Vienna, Austria 27 April — 02 May 2014. 2014. EGU2014-16847, 41 p.

Как цитировать эту статью:

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).