

УДК 523.98

## ГАММА-ВСПЫШКИ И КОМПЛЕКСЫ АКТИВНОСТИ НА СОЛНЦЕ

© 2020 г. В. М. Томозов<sup>1</sup>, С. А. Язев<sup>1, 2, \*</sup>, Е. С. Исаева<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

\*E-mail: syazev@gmail.com

Поступила в редакцию 13.01.2020 г.

После доработки 21.04.2020 г.

Принята к публикации 30.04.2020 г.

Проведен анализ мощных вспышечных событий из каталога Share и др. с длительной фазой гамма-излучения с целью объяснения особенностей импульсной и длительных фаз таких вспышек и выявления их связи с комплексами активности и корональными дырами. Показано, что 74% таких событий оказались тесно связанными с комплексами активности. Качественно продемонстрирована связь процессов ускорения частиц в ходе развития вспышки с изменениями магнитной топологии во вспышечной области и с эволюцией коронального выброса массы. Обсуждаются возможная связь корональных дыр с комплексами активности и роль “обменного” пересоединения в этих процессах.

DOI: 10.31857/S0004629920090078

### ВВЕДЕНИЕ

Гамма-излучение солнечного происхождения впервые было зарегистрировано во время мощных вспышек на Солнце 4 и 7 августа 1972 г. американской космической обсерваторией OSO-7 [1]. В настоящее время выполняется постоянный внеатмосферный мониторинг солнечного гамма-излучения. Выяснилось, что источники гамма-излучения наблюдаются сравнительно редко — порядка нескольких десятков явлений за цикл, т.е. проявляются далеко не во всех солнечных вспышках [2].

Происхождение источников гамма-излучения в солнечных вспышках традиционно связывается с ядерными взаимодействиями, при определенных условиях возникающими в солнечной атмосфере. Согласно классическим результатам [3], ускоренные во вспышках протоны и другие ионы с энергиями, превышающими 300 МэВ, при взаимодействии с плазмой солнечной атмосферы способны приводить к появлению нейтральных и заряженных ионов. В результате распадов нейтральных ионов рождаются гамма-кванты высоких энергий (>70 МэВ), образующие широкий спектр излучения с максимумом в области 70 МэВ, который иногда регистрируется детекторами на космических аппаратах. Таким образом, для возникновения гамма-излучения нужны потоки высокоэнергичных протонов при соблюдении вполне определенных условий, которые реализуются во время некоторых вспышек.

В последние годы большое внимание уделяется изучению вспышек с продолжительной фазой гамма-излучения, которые относятся к достаточно мощным и геоэффективным событиям. Они практически всегда сопровождаются быстрыми корональными выбросами массы (КВМ) типа гало. Ряд наших предыдущих работ [4–6] был посвящен изучению комплексов активности (КА) на Солнце и их геоэффективных проявлений. КА являются долгоживущими (от 3 до 17 солнечных оборотов) системами магнитных полей. Они проявляются в виде областей постоянного формирования пятен на участках с одними и теми же гелиографическими координатами. В максимуме развития КА могут представлять собой сложные магнитные конфигурации из взаимодействующих активных областей (АО). Именно в КА генерируются наиболее мощные вспышки и высокоскоростные КВМ, которые, в свою очередь, могут эффективно ускорять частицы. Наиболее вероятными механизмами ускорения частиц в областях действия магнитного пересоединения считаются электрические поля, плазменная и МГД-турбулентность, а также ударные волны [7, 8]. Концепция, согласно которой сложные многоуровневые магнитные системы КА с характерными регулярными актами выхода из-под фотосферы новых порций магнитного потока являются преимущественными областями локализации крупных солнечных вспышек, была представлена в работах [4, 6, 9]. Кроме того, в работах [5, 10, 11] была выявлена статистическая связь крупных солнечных

вспышек, локализованных в КА, с расположенными вблизи них низкоширотными корональными дырами (КД).

Настоящая работа посвящена исследованию связей вспышек, для которых характерна длительная фаза гамма-излучения, с КА и близкими к ним КД. Во второй и третьей частях работы приведены статистические данные об изучаемых вспышечных событиях и их связях с КА. В четвертом разделе с использованием известной модели “прорыва” развития вспышки [12, 13] приведены аргументы в пользу локализации областей наиболее эффективного ускорения частиц, которое может привести к появлению гамма-излучения. Здесь же выполнено сопоставление этих явлений с изменениями магнитной топологии в АО и с фазами вспышки. Наконец, в пятой части работы проведено краткое обсуждение связей КД с КА и возможной роли механизма обменного пересоединения [14] в обсуждаемых процессах с привлечением данных наблюдений.

## 2. ВСПЫШКИ С ДЛИТЕЛЬНЫМ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕМ И КОМПЛЕКСЫ АКТИВНОСТИ

В общем числе вспышек на Солнце особое место занимают события, сопровождающиеся длительным излучением в гамма-диапазоне электромагнитного спектра. В работе Share и др. [2] приведен каталог таких вспышек, наблюдавшихся с помощью внеатмосферной обсерватории Fermi/LAT (временное разрешение прибора LAT — одна минута) в течение 24 цикла активности. Этот список содержит 31 событие (первое в марте 2011 г., последнее — в июне 2015 г.). Как правило (но не всегда), эти события относятся к популяции вспышек с высоким рентгеновским классом. Перечень таких вспышек приведен в табл. 1.

В первом столбце табл. 1 приведен номер вспышки согласно данным [2], во втором указана дата вспышки. В третьем столбце отмечен номер кэррингтоновского оборота, в течение которого произошла вспышка, в четвертом — номер АО, где произошла вспышка. В пятом столбце указан номер КА, к которому относилась АО согласно каталогу [15], в шестом — рентгеновские баллы вспышек. Следует оговориться, что события 26 и 30 в таблице наблюдались за лимбом Солнца, поэтому приведенные для них оценки значений рентгеновских классов могут быть отягощены значительными погрешностями. В седьмом столбце указано, в ядре КА (Я), в ветви КА (В), или за пределами КА (Н) находилась вспышечно-активная АО. Здесь уместно напомнить, что ядром КА называется область на Солнце, где на протяжении не менее трех кэррингтоновских оборотов подряд наблюдается активность в форме пятен, ветвью КА называется АО, находящаяся

не более чем в  $30^\circ$  от ядра КА и связанная с ядром КА высокими корональными петлями [4].

В табл. 1 одна вспышка относится к классу С, 14 — к классу М, 16 — к классу Х, причем все они сопровождались КВМ. Анализ локализации гамма-вспышек на поверхности Солнца показал, что 14 событий произошли в ядрах КА, и 9 вспышек — в ветвях КА. Таким образом, 74% рассматриваемых вспышек оказались физически связанными с КА.

Восемь вспышек произошли в АО вне КА. Существенно, что 7 из 9 вспышек в ветвях КА произошли всего в двух АО: пять в АО № 11429 и две — в АО № 11882. Восемь гамма-вспышек вне КА возникли всего в четырех АО, в том числе две в АО № 11226, и четыре — в АО № 11748. Эти особенности в указанном смысле группы пятен требуют специального исследования. С этой оговоркой можно констатировать, что подавляющее большинство гамма-вспышек (практически три четверти) происходили в АО, связанных с КА.

## 3. ВСПЫШКИ С ДЛИТЕЛЬНЫМ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕМ И КОРОНАЛЬНЫЕ ДЫРЫ

Рассмотрим еще одно свойство локализации гамма-вспышек на Солнце. В работе [5] показано, что все протонные вспышки, которые генерировали потоки энергичных (с энергиями более 10 МэВ) частиц, зарегистрированных на орбите Земли в 24 цикле активности, произошли вблизи границ корональных дыр (КД). Распределение расстояний от центроидов протонных вспышек до ближайшей границы КД приведено на рис. 1 из работы [5], там же обсуждался вопрос об определении границ КД.

Кратчайшие расстояния от области локализации вспышки до границы ближайшей КД, определенные по синоптическим картам [16], были разбиты на 9 интервалов, причем каждый интервал составлял 60 Мм (несколько менее  $5^\circ$ ). Аналогичная процедура была выполнена и в отношении гамма-вспышек из табл. 1. На рис. 2 приведено процентное распределение расстояний от вспышки до границы ближайшей КД в тех же единицах, что и на рис. 1. (Здесь имеются в виду области расположения самих вспышек в видимой области спектра, а не зоны порожденного ими гамма-излучения, поскольку они могут отличаться).

Статистика событий (всего 31 вспышка) крайне невелика, но, тем не менее, можно отметить, что все без исключения вспышки, генерировавшие длительное гамма-излучение, произошли в непосредственной близости от границ КД (не более 240 Мм). Примеры показаны на рис. 3 и 4. Отметим, что две популяции вспышек, показанные на рис. 1 и на рис. 2, существенно пересекаются: подавляющее большинство гамма-вспышек на

**Таблица 1.** Характеристики вспышек с длительным гамма-излучением в 24 цикле активности

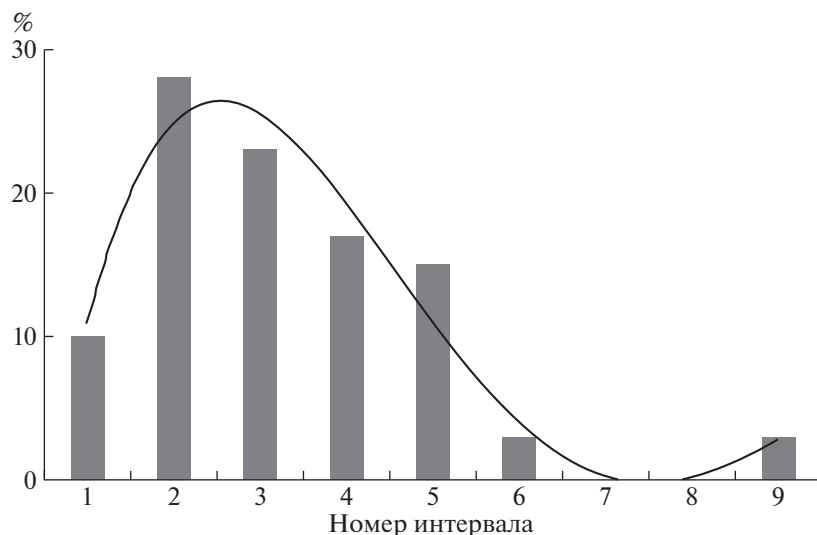
№	Дата вспышки	№ оборота	№ АО	№ КА	Балл вспышки	Положение вспышки
1	7.03.2011	2107	11164	N 06	M3.7	Я
2	2.06.2011	2110	11226		C3.7	Н
3	7.06.2011	2110	11226		M2.5	Н
4	4.08.2011	2113	11261	N07	M9.3	Я
5	9.08.2011	2113	11263	N12	X6.9	Я
6	6.09.2011	2114	11283	N11	X2.1	Я
7	7.09.2011	2114	11283	N11	X1.8	Я
8	24.09.2011	2115	11302	N07	X1.9	В
9	23.01.2012	2119	11402	N17	M8.7	Я
10	27.01.2012	2119	11402	N17	X1.7	Я
11	5.03.2012	2121	11429	N18	X1.1	В
12	7.03.2012	2121	11429	N18	X5.4	В
13	7.03.2012	2121	11429	N18	M7	В
14	9.03.2012	2121	11429	N18	M6.3	В
15	10.03.2012	2121	11429	N18	M8.4	В
16	17.05.2012	2123	11476	N20	M5.1	Я
17	3.06.2012	2124	11496	N20	M3.3	Я
18	6.07.2012	2125	11515	S11	X1.1	Я
19	23.10.2012	2129	11598	S10	X1.8	В
20	27.11.2012	2130	11618		M1.6	Н
21	11.04.2013	2135	11719	N26	M6.5	Я
22	13.05.2013	2137	11748		X1.7	Н
23	13.05.2013	2137	11748		X2.8	Н
24	14.05.2013	2137	11748		X3.2	Н
25	15.05.2013	2137	11748		X1.7	Н
26	11.10.2013	2142	11869	N31	M4.9	Я
27	25.10.2013	2143	11882	S24	X1.7	В
28	28.10.2013	2143	11882	S24	M4.4	В
29	25.02.2014	2147	11990	N33	X4.9	Я
30	01.09.2014	2154	12158		X2.1	Н
31	21.06.2015	2165	12371	N48	M2.6	Я

рис. 2 — это те же вспышки, которые породили потоки энергичных протонов (рис. 1).

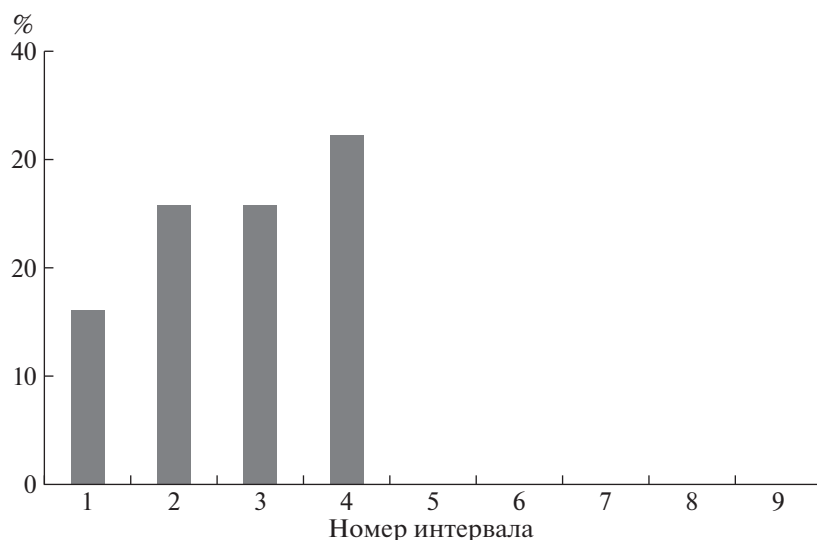
На рис. 3 можно видеть явно неслучайное расположение сильной вспышки 23.01.2012 вблизи изолированной (не связанной с полярной) КД. На изображении, полученном с обсерватории SDO (рис. 4), видно, что КД практически со всех сторон охватывают АО 12371, наблюдавшуюся в 2165 кэррингтоновском обороте в ядре КА 24N48 (нумерация по каталогу [15]). Здесь 21.06.2015 произошла последняя в 24 цикле гамма-вспышка с рентгеновским баллом M 2.6.

#### 4. РАЗВИТИЕ СИЛЬНОЙ ВСПЫШКИ В КОМПЛЕКСЕ АКТИВНОСТИ НА СОЛНЦЕ

Качественно рассмотрим процесс эволюции мощной солнечной вспышки в КА. Для вспышечно-активных КА характерны следующие особенности. Во-первых, подавляющее большинство вспышечно-активных групп пятен располагается в ядрах КА. Во-вторых, поскольку ядра КА являются участками солнечной поверхности, где последовательно всплывают новые порции магнитного потока (новые АО), в большинстве случаев здесь формируются системы арок магнитно-



**Рис. 1.** Зависимость расстояния от вспышки до ближайшей корональной дыры в 24 цикле активности [5]. Количество случаев в гистограмме приведено в процентах, расстояния — в интервалах по 60 Мм.

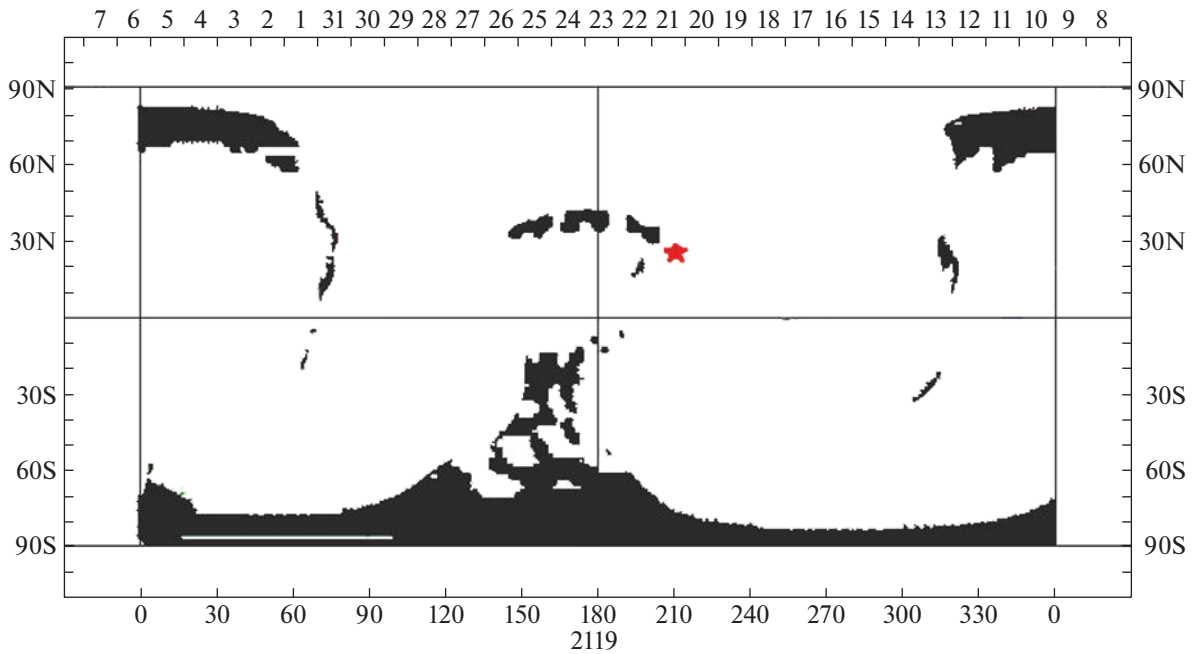


**Рис. 2.** Зависимость расстояния от гамма-вспышки до ближайшей корональной дыры в 24 цикле активности. Количество случаев в гистограмме приведено в процентах, расстояния — в интервалах по 60 Мм.

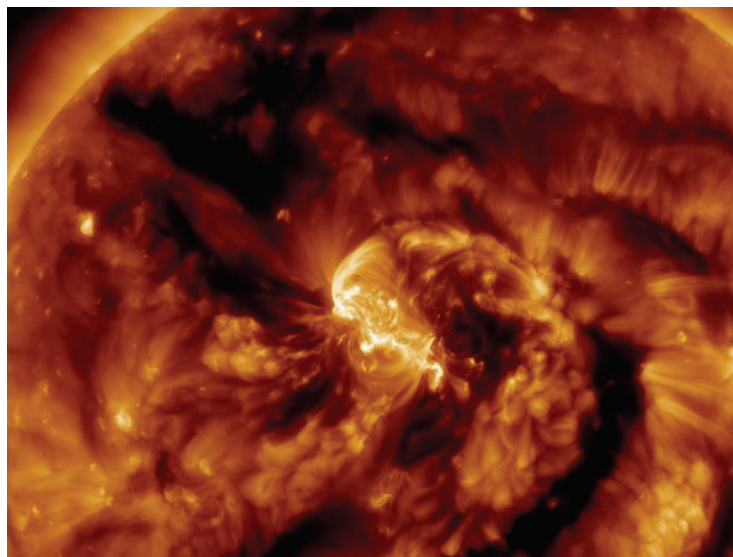
го поля на разных уровнях, причем “старые” арки отличаются значительной базой (расстояние между основаниями арок). Эти размеры в ряде случаев достигают 300 и даже 400 Мм [17]. Отмечены случаи, когда одно из оснований плотной низкой арки (волокну АО, расположенное над линией раздела полярностей, ЛРП) находится в области сильных магнитных полей вблизи пятен ядра КА, а второе основание — в области флоккулов на периферии АО или даже вблизи усиленных узлов хромосферной сетки далеко за пределами АО [18]. Именно такое волокно становится основой магнитного жгута, формирующего КВМ в хо-

де развития процесса вспышки. Заметим, что КА, породившие вспышки с длительным гамма-излучением, отличались протяженными ярко выраженными ЛРП с сильными градиентами магнитных полей в их окрестностях.

Перейдем к качественному описанию временной последовательности изменений магнитной топологии в структуре КА в ходе сильной вспышки и связанных с ними процессов ускорения частиц с использованием известной модели “прорыва” [12, 13]. В соответствии с этой моделью, сдвиговые, вихревые и другие движения вещества в фотосфере, запутывающие силовые линии маг-



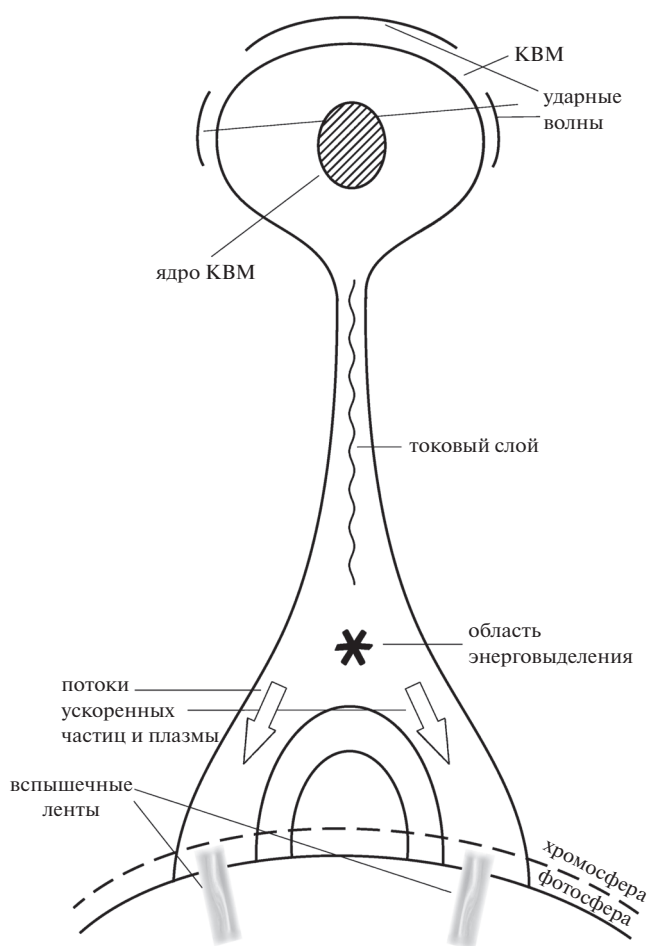
**Рис. 3.** Синоптическая карта расположения КД в 2119 кэррингтоновском обороте по данным обсерватории WSO [16]. По оси абсцисс внизу – кэррингтоновская долгота, вверху – даты, соответствующие положению центрального меридиана, по оси ординат – кэррингтоновская широта. Звездочкой показана локализация гамма-вспышки балла M8.7, происшедшей 23.01.2012 в АО 11402 в ядре КА 24N17 (нумерация по каталогу [15]).



**Рис. 4.** Фрагмент солнечной поверхности в свете линии 19.3 нм, полученный 21.06.2015 космической обсерваторией SDO. Темные области (КД) вплотную подходят к АО 12371 в ядре КА 24N48 (нумерация по каталогу [15]).

нитных полей в области ЛРП, приводят вышележащую магнитную структуру КА в неравновесное состояние. При этом возникают особые точки X-типа и развиваются токовые слои (ТС). В ТС включаются диссипативные процессы, приводящие к нагреву и ускорению частиц плазмы.

Как правило, вспышка начинается с появления небольших поярчений в линии  $H\alpha$  по обе стороны от ЛРП. Волокно, расположенное над ЛРП, при этом подвергается возмущениям. Затем начинается импульсная фаза вспышки с появлением ускоренных в ТС энергичных электронов.



**Рис. 5.** Качественное представление магнитной структуры эруптивной вспышки с КВМ. Звездочкой (\*) отмечена область интенсивного выделения энергии, обычно регистрируемая в жестком рентгеновском диапазоне (HXR) (ИСЗ GOES); в основаниях петель вспышки также наблюдается HXR. Стрелками показаны потоки быстрых частиц и горячей плазмы. Вокруг КВМ отмечены фронты ударных волн.

Почти одновременно с этим начинается подъем волокна вследствие развития в КА крупномасштабной МГД неустойчивости.

В поднимающейся магнитной структуре волокно образует ядро КВМ. Подъем КВМ сопровождается перестройкой замкнутой структуры магнитных полей над АО в открытую конфигурацию в результате действия процесса магнитного пересоединения. Отметим, что процесс магнитного пересоединения может быть многократным при последовательном прорыве системы вышележащих магнитных петель [19]. В результате этого процесса образуется магнитная структура в форме каспа с токовым слоем, расположенным позади уходящего КВМ (рис. 5) [19].

Известно, что на импульсной фазе вспышки в области выделения энергии (на рис. 5 эта область

отмечена звездочкой, \*) наблюдаются быстро движущиеся потоки горячей плазмы и пучки энергичных ускоренных частиц, часть которых по магнитным силовым трубкам распространяется в нижележащие слои солнечной атмосферы. Импульсная фаза вспышек с длительным гамма-излучением определялась по поведению профилей рентгеновского излучения в спектральной области (1–8 Å) по данным с SDO [20]. Продолжительность определенной указанным образом импульсной фазы вспышки составляла в среднем 20 минут. В ходе взаимодействия энергичных частиц с более плотной хромосферной плазмой в основаниях магнитных петель вещество нагревается. Именно в этих областях генерируется жесткое тормозное рентгеновское, ультрафиолетовое, а во время наиболее мощных вспышек, и гамма-излучение (область \* на рис. 5). Быстрый нагрев плазмы в хромосфере приводит к ее “испарению” и подъему с заполнением всего объема корональных магнитных арок. В этот период вспышки наблюдается максимальная эмиссия в мягком рентгеновском диапазоне.

На последующей (главной) фазе вспышки горячая плазма в системе арок длительное время излучает в мягком рентгеновском диапазоне, постепенно теряя энергию. По-видимому, подобная длительная фаза вспыхивающей эмиссии поддерживается процессами энерговыведения в результате процесса магнитного пересоединения в вертикально расположенном ТС, сформировавшемся позади КВМ.

На рис. 5 показана типичная топология магнитных полей во время эруптивной вспышки с КВМ на поздней стадии ее развития. В ходе импульсной фазы вспышки образуется структура в форме каспа и формируется протяженный слой ТС, следующий за КВМ. Отметим, что волокно, формирующее КВМ, начинает подниматься спустя несколько минут после импульсной фазы вспышки [12], а иногда и раньше.

В частности, по данным наблюдений с КА Fermi/LAT [2] было отмечено, что наиболее сильные потоки гамма-излучения наблюдаются в тех случаях, когда возникновение и развитие КВМ происходит до начала импульсной фазы вспышки или же непосредственно в ходе этой фазы (Минасянц и др., [20]). Отмечено также, что появление наиболее сильных потоков гамма-эмиссии и высокоскоростных КВМ происходило в пределах довольно ограниченных интервалов времени — от 2 до 16 мин. Для наиболее быстрых КВМ (в шести событиях) была выявлена линейная связь между максимальными потоками гамма-излучения  $F_{\max}$  ( $\gamma > 100$  МэВ) и скоростями КВМ [20]. Это может быть одним из признаков развития большой вспышки.

Формирование токового слоя вслед за поднимающимся КВМ происходит следующим образом. Уплотнение плазмы, образующееся вслед за движущимся образованием в газообразной среде, является хорошо известным физическим явлением. При движении плотного сгустка плазмы с магнитным полем (КВМ) со сверхзвуковой скоростью через плазму солнечной атмосферы в “спутном следе” за ним формируется компактная область сравнительно плотной плазмы, где близко располагаются зоны с магнитными полями противоположной направленности, — образуется ТС. При движении КВМ в солнечной короне линии поля стягиваются к слою ТС и увлекают за собой корональную плазму, вследствие чего позади КВМ образуются обширные зоны разрежения плазмы. “Пузырь” же в головной части КВМ при быстром движении сквозь плазму солнечной короны по мере падения плотности окружающего вещества быстро расширяется в стороны и формирует, помимо головной, боковые ударные волны на флангах, которые также могут ускорять частицы (как показано на рис. 5), но, вероятно, менее эффективно. Кроме того, как уже отмечалось в работе [5], КВМ образует “открытый канал” в короне, через который ускоренные во вспышке частицы могут проникать в верхние слои короны в КВМ и в гелиосферу. Представляется возможным, что в ходе восстановления структуры поля позади уходящего КВМ могут образоваться и обратные ударные волны, но это требует отдельного рассмотрения.

Описанная качественная картина получила некоторое подтверждение при наблюдениях развития вспышки класса X2.8 13 мая 2013 г. (начало в 15:50 UT) с помощью аппаратуры AIA/SDO в коротковолновом ультрафиолетовом (КУФ) диапазоне, а также в ходе наблюдений ИСЗ RHESSI в жестком рентгеновском диапазоне. Вспышка сопровождалась быстрым (1800 км/сек) КВМ типа гало, распространяющимся во внешней короне Солнца [21]. В ходе эволюции КВМ в ТС позади него развивались плазменные неустойчивости с рождением в токовом слое магнитных островов и включались диссипативные процессы, сопровождавшиеся нагревом плазмы и ускорением ионов и электронов [21, 22].

Таким образом, протяженный вертикальный слой ТС способен обеспечивать “энергетическую связь” между КВМ и вспышечной областью. Некоторая часть ускоренных в слое ТС энергичных электронов и ионов распространяется вниз, проникая в зону каспа магнитной структуры (\* на рис. 5), и генерирует жесткое рентгеновское излучение вспышки. Другая часть ускоренных частиц уходит непосредственно в область КВМ, обеспечивая дополнительный приток энергии в область выброса. Можно предположить, что именно процессы нагрева и ускорения плазмы в ТС за КВМ

ответственны за развитие длительной фазы процесса вспышки с постепенным затуханием выделения энергии. Следует добавить, что в работе Акимов и др. [23] отмечено, что в вертикальном ТС может происходить ускорение протонов электрическим полем вплоть до энергий  $\sim$  ГэВ [23].

Параметры плазмы в протяженном слое ТС за выбросом КВМ неоднократно определялись по данным наблюдений [24, 25]. В разных вспышечных событиях с КВМ было выявлено, что температура, мера эмиссии и плотность уменьшаются вдоль ТС с ростом высоты [25].

Наблюдения в КУФ диапазоне с космических обсерваторий Hinode и AIA/SDO показали, что температура плазмы в ТС может достигать 20 МК и выше, а максимальная температура регистрируется в основании ТС, в вершинах петель после вспышки [25] (\* на рис. 5). Во время эруптивной вспышки класса X8.2 10 сентября 2017 г. на западном лимбе Солнца была получена оценка толщины слоя ТС между областью каспа и КВМ, оказавшаяся равной  $3 \times 10^3$  км. Кроме того, на конечной стадии выброса волокна было замечено разделение ТС на несколько небольших слоев [26].

Таким образом, в рамках рассматриваемой модели длительная гамма-эмиссия объясняется ускорением протонов и электронов в межпланетных ударных волнах на фазе выхода КВМ в верхние слои короны и затем в межпланетную среду [2, 27]. Количественным свидетельством в пользу этого вывода является обнаруженная линейная связь между продолжительностью гамма-событий и конечной частотой радиовсплесков II типа в межпланетной среде [27]. Ударные волны КВМ, помимо ускорения электронов, генерирующих всплески радиоизлучения II типа, ускоряют и протоны до энергий  $>300$  МэВ. Часть энергичных протонов возвращается вниз по линиям магнитного поля к поверхности Солнца и генерирует гамма-излучение посредством распада пионов, причем область гамма-излучения может простираться на десятки градусов от КА, где произошел выброс КВМ [28]. Согласно оценкам [28], количество энергичных протонов, ускоряемых непосредственно в самой области вспышки (без учета КВМ), может составлять около 10% от общего числа протонов, создающих длительное гамма-событие. Продолжительность гамма-вспышек, превышающая несколько часов, может быть объяснена наличием резервуара ускоренных протонов позади КВМ, который взаимодействует с обширными областями верхней солнечной атмосферы вследствие существующей между ними магнитной связи.

Возможно также, что энергичные протоны рассеиваются волнами альвеновской турбулентности, что приводит к увеличению их времени

жизни в магнитных ловушках в межпланетной среде.

В работе [28] интервал излучения гамма-квантов высоких энергий ( $> 100$  МэВ) было предложено называть “второй устойчивой стадией” вспышечной эмиссии. Соответственно “первая стадия” события – это излучение в ходе импульсной фазы вспышки. Подчеркнем, что в подобных событиях, сопровождающихся гамма-излучением, длительность импульсной фазы составляла менее 20 мин, в то время как основная фаза гамма-эмиссии может продолжаться несколько часов.

### 5. СВЯЗЬ ВСПЫШЕК С КОРОНАЛЬНЫМИ ДЫРАМИ

В разделе 3 уже обсуждалась (в основном, статистически) локализация гамма-вспышек вблизи КД. Еще раз подчеркнем, что в ста процентах рассмотренных случаев вспышки, сопровождавшиеся длительными гамма-событиями, происходили вблизи границ КД. Здесь мы рассмотрим возможный механизм взаимодействия между КД и гамма-вспышками в КА с привлечением недавних наблюдений распределения магнитных полей в КД.

КД регистрируются в солнечной короне как области пониженной эмиссии в мягком рентгеновском диапазоне и в линиях КУФ-диапазона. Конфигурация магнитных полей в пределах КД носит преимущественно открытый характер. В открытом магнитном поле КД обычно преобладает одна полярность, что вызвано непрерывным дисбалансом выхода локального магнитного потока. КД являются источниками высокоскоростных потоков солнечного ветра, которые могут оказывать активное воздействие на магнитосферу Земли. В то же время эти образования не лишены признаков мелкомасштабной активности: в КД регистрируются яркие рентгеновские точки, иногда наблюдаются выбросы в рентгеновском диапазоне и изредка даже вспышки.

Связь между КД и КА подробно изучалась в работе Язева [11], в которой был сделан вывод о тесной генетической связи между КА и КД. Так, например, в этой работе было показано, что на фазе распада пятен эволюционирующие магнитные поля КА могут трансформироваться либо в изолированную КД, либо в “залив” полярной КД. Таким образом, КД и КА оказываются эволюционно связанными друг с другом. В пользу этой концепции свидетельствуют прямые наблюдения трансформации остаточных полей распадающегося КА в униполярное поле КД [10, 29, 30].

Вопрос о связи солнечных вспышек, которые сопровождаются выходом ускоренных энергичных частиц (в частности, протонов) в гелиосферу, с КД, обсуждался авторами в предыдущей работе [5]. Было выяснено, что КД, близко расположен-

ные к АО, создают условия для образования “каналов” выхода ускоренных частиц в гелиосферу для любых типов вспышек – как импульсных, так и длительных.

Известно, что наиболее энергичные солнечные вспышки обычно связаны с КВМ. Тем не менее существуют так называемые замкнутые магнитные конфигурации со вспышками, которые не сопровождаются КВМ. Вероятно, в этих случаях в магнитной конфигурации оказывается недостаточно запасенной энергии для того, чтобы возмущенное волокно могло прорвать вышележащее поле и образовать открытую структуру, модель “прорыва” в этом случае не реализуется. Для прояснения этого вопроса в работе [31] была использована выборка из 56 вспышек X-класса в 23 и 24 солнечных циклах. Результаты анализа показали, что вспышки X-класса, локализованные вблизи областей открытого магнитного поля, чаще оказывались эруптивными по сравнению с вспышками, где таких областей не наблюдалось. По-видимому, магнитные конфигурации, находящиеся вблизи КД, из-за взаимодействия с ними могут оказаться менее устойчивыми.

Как уже отмечалось, статистика позволяет утверждать, что близость КД к области возникновения вспышек в КА может рассматриваться как важный фактор, обеспечивающий возможность выхода ускоренных частиц в гелиосферу [5]. Так, например, в работах, посвященных изучению локализации источников солнечных космических лучей (СКЛ) [32, 33], был сделан вывод, что вспышки, ответственные за явления СКЛ, как правило, возникают вблизи поверхности раздела между КА и соседними КД. По-видимому, такие вспышки возникают в результате “обменного” магнитного пересоединения между соседними областями с замкнутым и открытым магнитным полем (физика процесса обменного пересоединения была подробно описана в работе Моффата [14]). Фактор “обменного” пересоединения уже обсуждался нами в предыдущей работе [5]. Там же отмечалась важная роль этого фактора в формировании открытых магнитных “каналов” в короне. В переходной области между открытым и закрытым магнитным потоком формируются выходящие в корону Солнца трубки магнитного поля и генерируются потоки альвеновских волн [34]. Потоки альвеновских волн способны привести к генерации вспышки в соседней области АО [5], если такая область окажется в состоянии, близком к потере равновесия. Отметим, что проявления обменного пересоединения зарегистрированы в солнечном ветре, при переполусовке магнитных полей в цикле активности, а также на границах АО.

Имеются данные, по крайней мере, о двух случаях наблюдений, иллюстрирующих проявления



процесса магнитного пересоединения при взаимодействии КД с АО. На границе КД наблюдался выход новой небольшой АО. В первом случае описано взаимодействие АО 10869 с близкой КД по данным SOHO/EIT и MDI. Были зарегистрированы петли магнитного поля между АО и КД, которые привели к “отступлению” границы КД. В то же время на противоположной стороне АО появился корональный димминг, который был объяснен открытием линий поля в этой зоне [35]. Во втором случае наблюдалась похожая картина: при рождении АО на границе КД (по данным SDO/HMI) образовалась система замкнутых линий поля, которая также привела к смещению границы КД [36]. Таким образом, вследствие описанного взаимодействия АО с соседней КД может измениться общая энергия магнитной конфигурации АО.

Подчеркнем, что все рассмотренные вспышки с продолжительным гамма-излучением из каталога [2] также произошли в непосредственной близости от КД, так что этот вывод имеет достаточно общий характер.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В работе приведены аргументы в пользу того, что гамма-вспышки на Солнце, которые сопровождалась КВМ, тесно связаны с КА (74% таких событий произошли в КА, а не в отдельных АО), а также с КД (все гамма-вспышки в течение 24 цикла солнечной активности происходили в непосредственной близости от границ КД). Кроме того, все рассмотренные вспышки, в которых наблюдалось гамма-излучение, сопровождалась явлениями КВМ.

Приведенная статистика показывает, что именно локализация КА вблизи КД является значимым фактором, воздействующим на вероятность возникновения гамма-вспышки. С учетом того обстоятельства, что КД в большинстве случаев генетически связаны с КА [11], фактор близости КД становится вполне естественным.

Для описания физического механизма гамма-вспышки была использована известная качественная модель, основанная на концепции “прорыва” магнитной структуры [12, 13]. В качестве необходимых для генерации гамма-излучения во вспышке следует ожидать выполнения следующих условий:

- наличие сильных магнитных полей, типичных для КА;
- наличие протяженного волокна АО в КА (магнитный жгут, порождающий КВМ);
- наличие вблизи вспышечного КА границы КД (процессы магнитного пересоединения на границе КА и КД инициируют вспышку, а сама зона открытого магнитного поля способствует

выходу ускоренных частиц в корону и гелиосферу).

В модели особо отмечена важная роль ТС (спутного следа за КВМ) в “подпитке” энергичными частицами, как собственно “тела” КВМ, так и области вспышки в нижележащих слоях атмосферы.

Можно констатировать, что условия, при которых возможно появление солнечных гамма-вспышек, во многом близки к условиям возникновения протонных вспышек [5]. По-видимому, здесь нет качественных различий, и гамма-вспышки генерируются при экстремальных значениях тех же физических параметров, которые приводят к протонным событиям.

Выводы работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Местами локализации вспышек с гамма-излучением являются КА (с КА связаны 74% таких событий). Для таких КА характерна протяженная ЛРП с высокими градиентами магнитного поля.
2. Наиболее сильные потоки гамма-излучения наблюдаются в тех случаях, когда КВМ происходит во время импульсной фазы вспышки и имеет высокую скорость.
3. Для всех случаев гамма-вспышек характерно присутствие близких КД. Вероятно, этот фактор является обязательным для возникновения гамма-излучения во вспышке.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при частичной поддержке проекта FZZE-2020-0017 Министерства науки и высшего образования РФ, а также поддержана проектом П.16.3.1 Института солнечно-земной физики СО РАН.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны рецензенту за важные и полезные замечания, учтенные в окончательном варианте статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. N. Suri, E. L. Chupp, D. J. Forrest, and C. Reppin, *Solar Phys.* **43**, 415 (1975).
2. G. H. Share, R. G. Murphy, S. M. White, et al., *Astrophys. J.* **869**, 182 (2018).
3. R. J. Murphy, C. D. Dermer, and R. Ramaty, *Astrophys. J. Supp. Ser.* **63**, 721 (1987).
4. S. A. Yazev, *Astronomy Reports* **59**, 228 (2015).
5. E. S. Isaeva, V. M. Tomozov, and S. A. Yazev, *Astronomy Reports* **62**, 243 (2018).
6. E. S. Isaeva, V. M. Tomozov, S. A. Yazev, *Астрон. журн.* **97**, 64 (2020).
7. А. Т. Алтынцева, В. Г. Банин, Г. В. Кузлин, В. М. Томозов, *Солнечные вспышки* (М., Наука, 1982).

8. Э. Р. Прист, Т. Форбс *Магнитное пересоединение. Магнитогидродинамическая теория и приложения* (М: Физматлит, 2005).
9. В. Г. Банин, С. А. Язев, Г. М. Хмыров, Солнечные данные, № 3, 116 (1991).
10. В. Г. Банин, С. А. Язев, Солнечные данные, № 1, 78 (1991).
11. С. А. Язев, *Известия ИГУ. Серия науки о Земле.* 3, № 2, 226 (2010).
12. G. A. Gary and R. I. Moore, *Astrophys. J.* **611**, 545 (2004).
13. S. K. Antiochos, C. R. DeVore, and J. A. Klimchuk, *Astrophys. J.* **510**, 485 (1999).
14. H. K. Moffatt, *J. Fluid Mech.* **159**, 359 (1985).
15. С. А. Язев, Препринт <http://ru.iszf.irk.ru/images/f/f2/000-> Таблица КА в 24 цикле активности для сайта ИСЗФ СО РАН (2019).
16. Синоптические карты корональных дыр <http://gong.nso.edu/data/magmap/QR/mqf/>
17. С. А. Язев *Феномен комплексов активности на Солнце* (Иркутск, Изд-во ИГУ, 2014).
18. G. N. Kichigin, L. I. Miroshnichenko, V. Sidorov, and S. A. Yazev, *Plasma Physics (in Russian)*, **40**, № 3, 241 (2014).
19. S. Masson, S. K. Antiochos, and C. R. DeVore, *Astrophys. J.* **884**, 143 (2019).
20. Г. С. Минасяни, Т. М. Минасяни, В. М. Томозов, *Солнечно-земная физика*, **5**, № 3, 11 (2019).
21. T. Gou, R. Liu, A. Veronig, E. Dickson, and A. Hernandez-Perez, 42<sup>nd</sup> COSPAR Scientific Assembly: held 14–22 July 2018, Pasadena, California, USA/ Abstract id: D2, 3–15–18.
22. W. Manchester, K. J. Kilpua, Y. D. Liu, et al., *Space Sci. Rev.* **212**, 1159 (2017).
23. V. V. Akimov, P. Ambrož, A. V. Belov, A. Berlicki, et al., *Solar Physics* **166**, 107 (1996).
24. L. P. Li, J. Zhang, J. T. Su, and I. Liu, *Astrophys. J. Lett.* **829**, 7 (2016).
25. H. P. Warren, D. H. Brooks, I. Ugarte-Urra, J. W. Reep, N. A. Crump, and G. A. Doschek, *Astrophys. J.* **854**, 122 (2018).
26. X. L. Yan, L. Y. Yang, Z. K. Xue, et al., *Astrophys. J. Lett.* **853**, 18 (2018).
27. N. Gopalswamy, P. Mäkelä, S. Yashiro, et al., *Astrophys. J. Lett.* **868**, 19 (2018).
28. G. H. Share, R. G. Murphy, K. Tolbert, B. Dennis, et al., preprint 1711.01511 (2017).
29. V. Bumba. In: *Solar Maximum Analysis. Additional Issue. Proceedings of the International Workshop held in Irkutsk, USSR, 17–24 June, 1985.* Novosibirsk: Nauka, Siberian Division, 255. (1988).
30. V. Bumba, A. Garcia, and S. Jordan. *Astron. and Astrophys.* **329**, 1138 (1997).
31. M. L. DeRosa and G. Barnes, *Astrophys. J.* **861**, 131 (2018).
32. Y. M. Wang, M. Pick, and G. M. Mason, *Astrophys. J.* **639**, 495 (2006).
33. N. V. Nitta, D. V. Reames, M. L. De Rosa, and Y. Liu, *Astrophys. J.* **650**, 438 (2006).
34. B. J. Lynch, J. K. Edmondson, and Y. Li, *Solar Phys.* **289**, 3043 (2014).
35. D. L. Baker, van Driel-Gesztelyi, and G. D. R. Attrill, *Astron. Nachr.* **328**, 773 (2007).
36. D. F. Kong, G. M. Pan, X. L. Yan, J. C. Wang, and Q. L. Li, *Astrophys. J. Lett.* **863**, 22 (2018).