

ФОРМИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКА СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ЭРУПТИВНЫХ ВСПЫШКАХ X6.9 9 АВГУСТА 2011 ГОДА И M5.1 17 МАЯ 2012 ГОДА

© 2022 г. И. Ю. Григорьева^{1, *}, А. Б. Струминский^{2, **}

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

*E-mail: irina.2014.irina@mail.ru

**E-mail: astrum@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 14.12.2021 г.

После доработки 21.02.2022 г.

Принята к публикации 21.02.2022 г.

Наличие корональных выбросов массы (КВМ) и солнечных протонных событий (СПС) в межпланетном пространстве (МП) после слабых вспышек в мягком рентгеновском диапазоне уже не является необычным фактом. Однако до сих пор оставалось непонятным, каким образом в таких случаях могут реализовываться близкие к предельным характеристики КВМ и СПС. В работе проведено сравнение результатов наблюдений событий на Солнце и в МП, связанных с длительной вспышкой M5.1 17 мая 2012 г. с невыраженной импульсной фазой (относительно слабым электромагнитным (ЭМ) излучением) и короткой мощной вспышкой X6.8 9 августа 2011 г. с ярко выраженной импульсной фазой (сильным ЭМ-излучением). Обе вспышки в МП сопровождалась мощными потоками солнечных космических лучей (СКЛ): протонов >100 МэВ и электронов >1 МэВ; быстрыми КВМ со скоростями >1500 км/с. Из сравнения характеристик ЭМ-излучения вспышек, КВМ и СКЛ на масштабе времени от нескольких минут до нескольких часов (после начала наблюдения нетеплового излучения в M5.1 и X6.8) следует, что свойства КВМ и СКЛ определяла длительность вспышечных процессов, а не их наблюдаемая интенсивность. Более длительный и более интенсивный выход солнечных протонов в МП в событии M5.1, по сравнению с X6.8, был обусловлен развитием вспышки только в короне, без явного “хромосферного испарения” – изменений температуры $(dT/dt)_{M5.1} < (dT/dt)_{X6.8}$ и меры эмиссии $(dEM/dt)_{M5.1} < (dEM/dt)_{X6.8}$, движением КВМ с меньшей величиной ускорения ($a_{1705} < a_{0908}$) и, соответственно, с большей длительностью $t_{M5.1} = V_{M5.1}^{max}/a_{M5.1} > V_{X6.8}^{max}/a_{X6.8} = t_{X6.8}$ для достижения максимальной скорости. Более длительное ускорение КВМ предполагает и более длительные процессы энерговыделения (ускорения) на фазе спада вспышки. Эти процессы происходили в системе высоких послевспышечных петель при плотностях плазмы и величинах магнитного поля недостаточных для генерации жесткого рентгеновского и микроволнового излучения выше порога регистрации современных приборов. О том, что энерговыделение все же имело место, свидетельствовали только длительное γ -излучение, зарегистрированное FermiLAT, и продолжающиеся ускорение КВМ.

Ключевые слова: солнечные вспышки, импульсные и постепенные вспышки, корональные выбросы массы, ускорение корональных выбросов массы, ускорение и распространение солнечных электронов и протонов, солнечное γ -излучение

DOI: 10.31857/S0004629922060044

1. ВВЕДЕНИЕ

Ускорение электронов и протонов до релятивистских энергий и корональные выбросы массы (КВМ) со скоростями, сравнимыми с максимальными оценками скорости Альвена (~ 3000 км/с, Green et al., 2018 [1]), являются самыми опасными факторами “космической погоды”. Число событий, сопровождающихся такими явлениями од-

новременно, составляет от нескольких единиц до нескольких десятков в различных циклах солнечной активности.

Об ускорении релятивистских протонов на Солнце можно судить по наблюдениям возрастания интенсивности космических лучей на Земле (Ground Level Enhancement, GLE) или по регистрации γ -излучения от распада π_0 -мезонов (π_0).

gamma-ray, PGR) во время и после солнечных вспышек. За всю историю наблюдений с 1942 г. по настоящее время зарегистрировано 72 GLE-события (Мирошниченко, 2018 [2]) и около 40 солнечных PGR-вспышек с 1982 г. (Chupp et al., 1982 [3], Ackerman et al., 2014 [4], Share et al., 2017 [5] и ссылки там). Последние успехи γ -астрономии Солнца [4] связаны с наблюдениями Fermi Gamma Ray Observatory (FermiGRO) телескопом (Large Area Telescope, LAT).

Необходимо отметить, что существует дилемма: ускоряются ли релятивистские протоны в солнечных вспышках или на ударном фронте КВМ (см., например, Мирошниченко, 2018 [2], Cliver et al., 2019 [6], Струминский и др., 2020 [7] и ссылки там)? Характерные времена основных процессов (ускорения протонов >100 МэВ, ускорения КВМ и распространения релятивистских протонов до наблюдателя на Земле) составляют примерно 10 мин. Это обстоятельство затрудняет их разделение во времени по наблюдениям и не позволяет во многих случаях однозначно разрешить дилемму.

По теоретическим представлениям (Miller et al. 1997 [8]) только стохастический механизм ускорения МГД турбулентностью способен длительно ускорять электроны ~ 10 МэВ и протоны ~ 100 МэВ. Поэтому совместное исследование солнечных электронов ~ 10 МэВ и протонов >100 МэВ в МП позволяет отождествить механизм ускорения заряженных частиц в солнечных вспышках (Струминский и др., 2020 [7]).

Возможность детального исследования КВМ появилась после запуска космического аппарата (КА) SOHO (Solar and Heliospheric Observatory), на борту которого находятся ультрафиолетовый телескоп EIT (Extreme Ultraviolet Imaging Telescope) и коронограф LASCO (Large Angle Spectrometric Coronagraph) (см., напр., обзоры Gopalswamy, 2016 [9], Green et al., 2018 [1], Филиппов, 2019 [10]). Телескоп EIT позволяет наблюдать корональные структуры в проекции на плоскость неба, а коронограф LASCO – движение КВМ в трех областях поля зрения от центра Солнца: C1 (1.1–3 R_S), C2 (1.5–6 R_S) и C3 (4–30 R_S), где R_S – радиус Солнца.

Первые результаты наблюдений LASCO были обобщены в работе Zhang et al., 2001 [11]. В развитии КВМ было выделено три фазы: начальная, с импульсным ускорением и с равномерным распространением. Начальная фаза характеризуется медленным подъемом со скоростью <80 км/с в течение десятка минут перед солнечной вспышкой. Фаза импульсного ускорения длится от нескольких до десятков минут, хорошо совпадает со вспышкой в мягком рентгеновском (SXR) излучении и прекращается вблизи его максимума. Далее следует фаза распространения с постоянной

или медленно уменьшающейся скоростью. Эти представления о кинематике КВМ, сформулированные Zhang et al., 2001 [11], являются в настоящее время определяющими (см., например, Филиппов, 2019 [10]).

К сожалению, LASCO C1 прекратил свою работу в 1998 г. Отсутствие наблюдений LASCO C1 удалось компенсировать с помощью других инструментов. Так, в работе Gallagher et al., 2003 [12] для исследования импульсного ускорения КВМ, связанного со вспышкой X1.5 21 апреля 2002 г., были использованы изображения, полученные инструментами на борту КА TRACE (Transition Region and Coronal Explorer). Авторы [12] отмечают, что в этом событии начало ускорения совпало с ростом жесткого рентгеновского (HXR) излучения с энергиями >25 кэВ по данным детектора КА RHESSI (Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager), а наибольшее ускорение КВМ наблюдалось в максимуме HXR. Это подразумевает связь между ускорением нетепловых электронов во вспышке и силами, обеспечивающими ускорение КВМ.

Благодаря коронографам COR1 и COR2 (Solar Terrestrial Relations Observatory, STEREO) удалось пронаблюдать вблизи поверхности Солнца КВМ, связанный со вспышкой M5.1 17 мая 2012 г. (Gopalswamy et al., 2013 [13]). После запуска КА SDO (Solar Dynamic Observatory) в 2010 г. стало возможным изучать КВМ в нижней короне Солнца с помощью инструмента AIA (Atmospheric Imaging Assembly). Новые и неожиданные результаты по кинематике КВМ и его связи с нетепловым излучением солнечной вспышки X2.8 13 мая 2013 г. получены в работе Gou et al., 2020 [14]. Впервые было показано, что КВМ был ускорен в двух различных фазах: в импульсной, с максимальной величиной ускорения ~ 5 км/с², и в длительной, с величиной ускорения до 0.7 км/с². Эти две фазы ускорения КВМ соответствовали двум различным эпизодам энерговыделения: первый – “стандартной” эрупции магнитного волокна, второй – постэруптивному энерговыделению в петлях большого масштаба и ускорению частиц, генерирующих нетепловое рентгеновское и γ -излучение (Gou et al., 2020 [14]). В событии 10 сентября 2017 г. и 7 марта 2011 г., по всей видимости, также было две фазы ускорения КВМ (Струминский и др., 2021 [15]).

Проблема происхождения СКЛ тесно связана с другими фундаментальными вопросами солнечной физики: существованием двух фаз ускорения заряженных частиц в солнечных вспышках (Whild et al., 1963 [16], Ramaty et al., 1978 [17], Shih et al., 2009 [18]), двух классов вспышек – импульсных и длительных (Sturrock and Coppi, 1966 [19], Pallavicini et al., 1977 [20]) и взаимосвязи вспышек и КВМ (Gosling, 1993 [21], Svestka 1995

[22], Hudson, 1995 [23]). Так, согласно Svestka and Cliver, 1992 [24] и Svestka, 1995 [22], понятие “эруптивных вспышек” было введено для всех вспышек (как с хромосферными эффектами, так и без), которые приводят к эрупции (выбросу), в частности к КВМ. Здесь и далее под хромосферными эффектами мы имеем в виду процессы, приводящие к нагреву плотной (обычно хромосферной) плазмы с последующим заполнением ею корональных петель – “хромосферное испарение” (рост EM , $EM = n^2V$).

По-видимому, в основе эруптивных вспышек лежит один и тот же физический механизм множественного магнитного пересоединения (когда происходит большое число элементарных актов ускорения частиц и выделения энергии). Однако этот процесс приводит к различным наблюдаемым проявлениям, которые сильно зависят от локальных физических условий до и во время события (плотности и температуры плазмы, величин магнитного поля и его трехмерной структуры). Солнечная вспышка является нелинейным явлением, в котором обычно невозможно “разделить переменные” и существуют эффекты обратной связи.

Чтобы облегчить задачу “разделения переменных”, нами был предложен и развивается подход (Струминский и др., 2020 [7]), основанный на совместном анализе данных по возрастаниям интенсивности солнечных электронов 1–10 МэВ и протонов >100 МэВ после эруптивных вспышек, связанных с КВМ, как с сильным, так и слабым электромагнитным (ЭМ) излучением (Григорьева и др., 2020 [25], Struminsky et al., 2020 [26]). События рассматриваются в единой шкале времени, обычно, относительно начала радиоизлучения на 15.4 ГГц по данным наземной сети станций круглосуточного наблюдения солнечного радиоизлучения (Radio Solar Telescope Network, RSTN, Guidice et al., 1981 [27])¹.

Ниже мы применяем этот подход для анализа двух PGR-вспышек (Ackerman et al., 2014 [4], Share et al., 2018 [5]): (1) импульсная вспышка X6.9 SOL2011-08-09 (Шарыкин и др., 2015 [28], Share et al., 2018 [5]) и (2) постепенная вспышка M5.1 SOL2012-05-17 (Share et al., 2018 [5]). Обе вспышки сопровождалась в МП быстрыми >1500 км/с КВМ и сопоставимыми по интенсивности и длительности потоками солнечных электронов 1–10 МэВ и протонов >100 МэВ. Но только протонное событие от SOL2012-05-17 сопровождалось GLE. Это было первое и неожиданное GLE 24-го цикла (Li et al., 2013 [29], Gopalswamy et al., 2013 [13]).

Основные характеристики исследуемых событий приведены в табл. 1, информация взята из

сводных отчетов о солнечной активности, составленных американским Центром предсказания космической погоды (SWPC NOAA, Space Weather Prediction Center of the National Oceanic and Atmospheric Administration)². В табл. 1 и ниже на рисунках потоки радиоизлучения приведены в солнечных единицах потока (10^{-19} эрг с^{-1} см^{-2} Гц^{-1} , solar flux unit, s.f.u.), потоки протонов в МП в единицах потока протонов ($(\text{см}^2 \text{ с пр})^{-1}$, proton flux unit, p.f.u.). Температура (T) и мера эмиссии (EM) вспышечной плазмы были вычислены из 2-секундных интегральных потоков SXR излучения в каналах 1–8 Å и 0.5–4 Å детектора KA GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite)³ в пакете *SolarSoft* в одностепенном приближении. Данные по наблюдениям КВМ взяты из электронного каталога SOHO LASCO CME CATALOG⁴ ([30] Gopalswamy et al., 2009). В настоящее время единственным детектором релятивистских электронов в каналах 0.27–0.7 МэВ, 0.67–3.0 МэВ и 2.64–10.4 МэВ вблизи Земли является прибор EPHIN (Electron Proton Helium Instrument, Müller-Mellin et al., 1995 [31]) на борту KA SOHO, который находится в точке Лагранжа L1. В работе обсуждаются потоки электронов, измеренные EPHIN, во время исследуемых событий. Информация по солнечным протонным событиям (СПС) взята из каталога www.wdcb.ru/stp/data/SPE/List_SPE_24_Cycle_SA.pdf. Вся информация и численные данные по событиям находятся в открытом доступе.

Почему событие СКЛ после X6.9 SOL2011-08-09 было слабее (см. табл. 1), чем после M5.1 SOL2012-05-17? Аналогичный вопрос задавали себе Gopalswamy et al., 2013 [13] и, как приверженцы ускорения на ударной волне, пришли к выводу, что ударная волна перед КВМ SOL2011-08-09 была слабее и сформировалась позже, чем в M5.1 SOL2012-05-17. Авторы [29] (Li et al., 2013) получили свидетельства ускорения на ударной волне КВМ протонов с кинетической энергией ~1.12 ГэВ, ответственных за GLE M5.1 SOL2012-05-17.

Мы представляем свое видение развития исследуемых событий и акцентируем внимание на трех новых моментах: 1) использование детектора ACS SPI (Anticoincidence Subsystem спектрометра SPI) на KA INTEGRAL (International Gamma Ray Laboratory), который показывает более ранний приход протонов по сравнению с традиционными детекторами; 2) описание временных профилей протонов >100 МэВ GOES в модели с длительной инжекцией и диффузионным распро-

¹ ftp.ngdc.noaa.gov/STP/space-weather/solar-data/solar-features/solar-radio/

² ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/events/

³ satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/

⁴ cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/

Таблица 1. Некоторые характеристики рассматриваемых событий. А – дата, нулевое время UT – начало излучения на 15.4 ГГц, балл и координаты вспышки, Б – начало, максимум и конец SXR вспышки (GOES); В – время T_{\max} , запаздывание EM_{\max} относительно T_{\max} ; Г – время первого появления КВМ t_1 и его средняя скорость $V_{\text{ср}}$ (LASCO_C2 и C3); Д – моменты начала, максимума и конца радиоизлучения зарегистрированного на частоте 245 МГц (RSTN); Е – момент, величина максимума и конец излучения на 15.4 ГГц (s.f.u.); Ж – начало радио-всплесков III, II и IV типов; З – начало роста сглаженных средних потоков протонов >100 МэВ (GOES), электронов 2.64–10.4 МэВ (SOHO/EPHIN) для первой и второй фаз ускорения (см. Струминский и др., 2020 [7], Струминский и др., 2020 [32] и ссылки там); И – максимальный поток ≥ 10 МэВ в максимуме; степенной показатель интегрального спектра протонов; квази-максимальная энергия протонов в событии.

А	09.08.2011 08:01			17.05.12 01:30		
	X6.9 / N17W69			M5.1/ N11W76		
Б (мин)	−13	+5	+7	−5	+17	+44
В (мин)	+2		2	+10		11
Г (мин/(км с ^{−1}))	+11		1610	+18		1582
Д (МГц/мин)	−1	+1	+8	−1	+12	+28
Е (мин/sfu/мин)	+2	1600	+6	+6	300	+14
Ж (мин)	+16(?)	0	+19(?)	+3	+1	+2
З (мин)	+14	+3	+14	+20	нет	+19
И (pfu, γ , МэВ)	21.3	2.0	700	180	2.15	3000

странением; сравнение длительности инжекции протонов со временем регистрации γ -излучения >100 МэВ (FermiGRO/LAT); 3) учет возможности ускорения КВМ в двух фазах – импульсной и постепенной. Рассмотрение этих факторов приводит нас к выводу, что протоны ускорялись преимущественно во вспышках на фоне развития КВМ. Именно различия вспышек определяли наблюдаемые характеристики КВМ и СКЛ.

2. НАБЛЮДЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ И ПРОТОНОВ

Временные профили интенсивности электронов 2.64–10.4 МэВ SOHO EPHIN, взятые с сайта www2.physik.uni-kiel.de/SOHO/phperph/EPHIN.htm, показаны на рис. 1а, а профили протонов >100 МэВ GOES (cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/NOAA/particle/) – на рис. 1б.

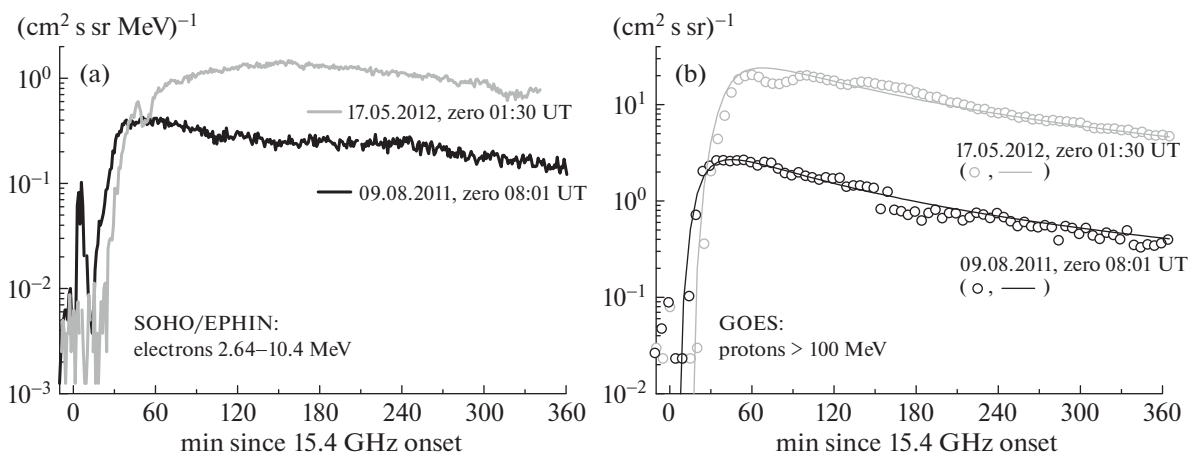


Рис. 1. Временные профили интенсивности: (а) электронов – 1 мин средние, измеренные в точке L1 детектором EPHIN/SOHO в канале 2.64–10.4 МэВ, (б) протонов – 5 мин средние >100 МэВ по данным GOES на геостационарной орбите в событиях 9 августа 2011 г. (черные открытые значки и модельная серая линия) и 17 мая 2012 г. (серые открытые значки и модельная черная линия).

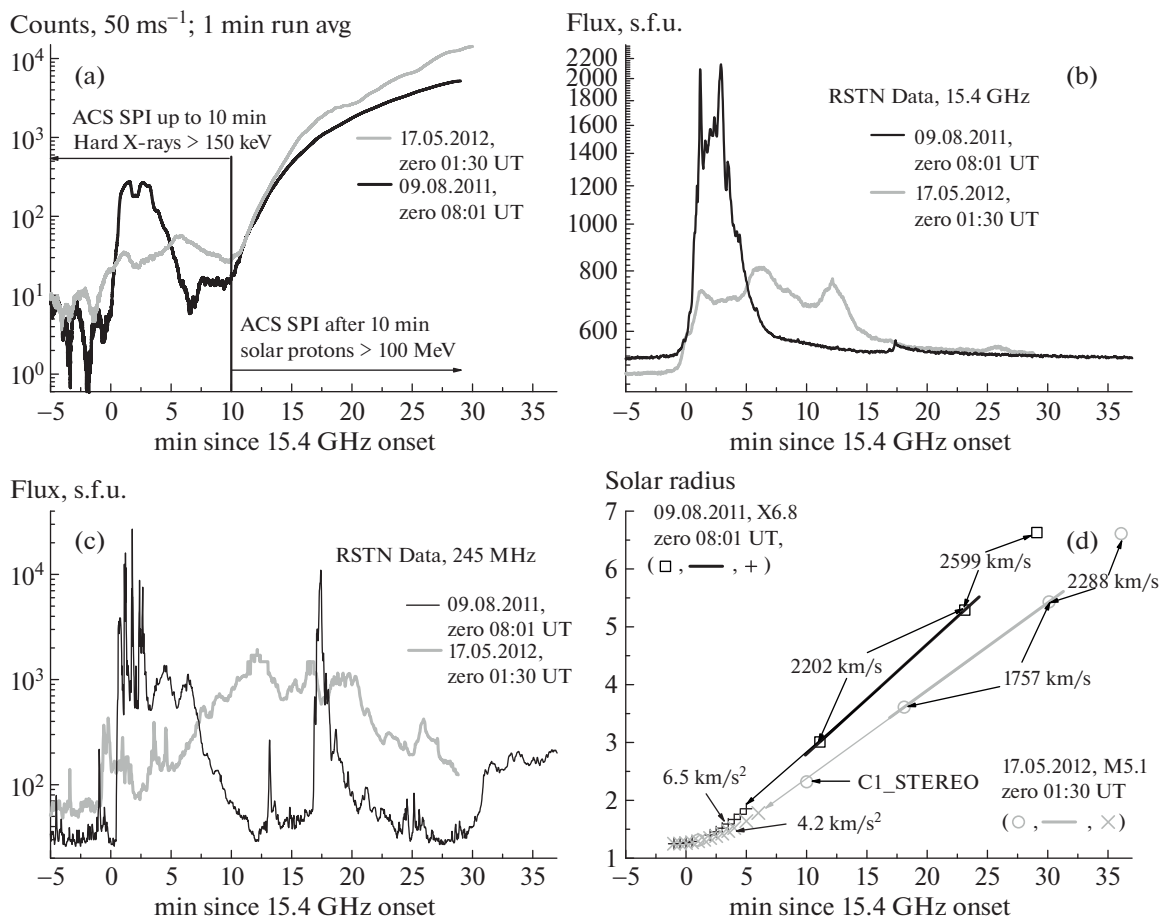


Рис. 2. Временные профили: (а) темпа счета ACS SPI за 50 мс (сглаженные средние за 1 мин); потока радиоизлучения на частотах (RSTN): (b) 15.4 ГГц и (с) 245 МГц. (d) положение КВМ по наблюдениям (открытые значки) и в модели равномерного ускорения (крестики) в событиях 9 августа 2011 г. (черные кривые и значки) и 17 мая 2012 г. (серые кривые и значки).

В событии SOL2011-08-09 по времени первого прихода электронов в работе Струминского (2020, [32]) была определена минимальная длина пройденного ими пути $\approx (1.3 \pm 0.1)$ астрономических единиц (а.е.) в предположении, что они вышли в МП в нулевой момент (рис. 1а и табл. 1). Тогда для протонов 100 и 500 МэВ ($V/c = 0.43$ и 0.76) время запаздывания при такой длине пути будет $\sim 16 \pm 2$ и $\sim 6 \pm 1$ мин соответственно.

На рис. 2а построены временные профили темпа счета детектора ACS SPI, который чувствителен к квантам HXR > 150 кэВ и протонам > 100 МэВ. (ACS SPI используется нами как интегральный некалиброванный детектор солнечных протонов (см., напр., Струминский и др., 2020 [7], Струминский и др., 2020 [32] и Струминский и др., 2021 [33]). По данным, доступным на сайте isdc.unige.ch/~savchenk/spiacs-online/spiacs-ipnlc.pl с временным разрешением 50 мс, был вычислен и вычтен фон на (-60) мин, далее были рассчитаны скользящие средние за 1 мин. Возрастание темпа

счета ACS SPI после (+10) мин (рис. 2а) показывает приход протонов к наблюдателю. Если это были протоны > 500 МэВ, то время их выхода в МП должно быть $(+4) \pm 1$ мин.

На рис. 2а видно, что при выбранных моментах нулевого времени (см. табл. 1) ACS SPI показал практически совпадающий по интенсивности темп счета с (+10) до (+15) мин в двух событиях. Позднее кривая для SOL2012-05-17 становится выше, что может быть связано с приходом релятивистских протонов, ответственных за GLE, которым было нужно большее время для ускорения. Согласно результатам Gopalswamy et al., 2013 [13] GLE в SOL2012-05-17 началось между 01:38–01:45 UT с медианным временем 01:43 UT (+13 мин). Так как время начала роста темпа счета ACS SPI (рис. 2а) совпадает в обоих событиях, то мы считаем, что в них условия выхода протонов в МП были одинаковыми, а длина пути пройденного протонами до наблюдателя была $\approx (1.3 \pm 0.1)$ а.е.).

Момент первой регистрации детектором GOES протонов >100 МэВ (табл. 1, рис. 1b) определяет время их выхода в МП, которое для исследуемых событий будет (0) и (+4) мин соответственно. Отсюда следует, что в событии SOL2012-05-17 протоны 100 МэВ удерживались вблизи Солнца примерно на 4 мин дольше, чем в SOL2011-08-09. Для достижения протонами релятивистских энергий при стохастическом ускорении необходимо дополнительное время.

В работе Li et al., 2013 [29] для SOL2012-05-17 в предположении одновременного выхода электронов различной энергии было получено, что время их выхода в МП было $(01:29 \pm 00:01)$ UT и длина распространения в МП (1.25 ± 0.05) а.е.). При этом протоны различных энергий вышли в МП одновременно, на 10 мин позднее электронов, и прошли такое же расстояние до Земли. По нашему мнению, предположение о том, что функция инжекции электронов и протонов не зависит от энергии и времени, сделанное в работе Li et al., 2013 [29], не является обоснованным. Например, оно не выполняется при длительном стохастическом ускорении.

Как было показано (Струминский, 2003 [34]), на фазе роста интенсивности протонов до максимума (так же, как и для электронов) преимущественную роль играет их инжекция в МП, которая может быть длительной и малой интенсивности. На рис. 1 видно, что максимумы потоков электронов и протонов в SOL2012-05-17 наблюдались позднее, чем в SOL2011-08-09, и их значения были больше. Для этого инжекция электронов и протонов в МП в SOL2012-05-17 должна была быть более длительной, что и привело к большим флюенсам электронов и протонов вблизи Земли.

На рис. 1b приведены результаты расчета интенсивности протонов 100 МэВ в модели с длительной переменной инжекцией и при диффузионном распространении (Струминский, 2003 [34], Struminsky, 2013 [35]). В SOL2011-08-09 модельная инжекция протонов была постоянной, длилась между (0) и (+5) мин, длина свободного пробега протонов была ~ 0.23 а.е. В SOL2012-05-17 постоянная инжекция протонов в МП длилась между (+5) и (+25) мин, и была в 5 раз интенсивнее, а длина свободного пробега была ~ 0.20 а.е. (Struminsky, 2013 [35]). Таким образом, в SOL2012-05-17 в МП было выпущено в 20 раз больше протонов 100 МэВ, чем в SOL2011-08-09, причем большая их часть вышла в МП после (+10) мин.

Временные профили потоков релятивистских электронов и протонов >100 МэВ были подобны в событии SOL2011-08-09 (Струминский и др., 2020 [32]), а также в SOL2012-05-12 (Струминский, 2019 [36]). Из этого подобия и следуя идеям Струминского и др. (2020, [7]), мы делаем вывод,

что электроны и протоны ускорялись во вспышках во множестве элементарных актов с длительностью, меньшей всего времени ускорения (стохастически), а не ударными волнами КВМ.

3. НАБЛЮДЕНИЯ ВСПЫШЕК

Рисунок 2 представляет обзор результатов наблюдений исследуемых солнечных событий. Временные профили HXR излучения >150 кэВ, зарегистрированного ACS SPI (рис. 2a) и микроволнового излучения на RSTN частоте 15.4 ГГц (рис. 2b), показывают, что релятивистские электроны появились на Солнце и начали взаимодействовать с плазмой и магнитным полем (рост интенсивности на профилях) примерно в одно время. Именно поэтому этот момент выбран за ноль в нашей шкале времени (начало второй фазы ускорения, согласно Струминскому и др., 2020 [32]). Радиоизлучение регистрировалось на всех частотах RSTN от 15.4 ГГц до 245 МГц, согласно отчетам SWPC NOAA. Временные профили радиоизлучения на этих крайних частотах показаны на рис. 2b, с.

Совместный анализ нетеплового солнечного излучения, производных температуры dT/dt и меры эмиссии dEM/dt вспышечной плазмы (см. рис. 3) позволяет выделить фазы преимущественного изменения T и EM . Делая шаг на пути “разделения переменных” в описании вспышечных процессов, мы отмечаем, что максимальные величины dT/dt и dEM/dt для SOL2011-08-09 почти на порядок больше, чем для SOL2012-05-12. Следовательно, эффект хромосферного в SOL2012-05-12 испарения если и был, то незначительный. Длительности изменений T и EM различались: ~ 5 мин в SOL09-09-2011 и ~ 20 мин в SOL17-05-2012, что соответствует длительности ускорения электронов (возрастанию потока HXR- и радиоизлучения, видимых на рис. 2a–с примерно с той же длительностью). Заметим, что третий эпизод ускорения электронов в SOL2012-05-17 (третий локальный максимум $\sim (+11)$ мин), который виден на 15.4 ГГц (рис. 2b, серая кривая), скрыт под начавшимся протонным возрастанием в данных ACS SPI (рис. 2a, серая кривая).

Соотношение между наблюдаемыми интенсивностями излучений, генерируемых различными физическими механизмами (рис. 2a–с), позволяет предположить, что в SOL09-08-2011 взаимодействие ускоренных электронов происходило в плазме с величинами концентрации и магнитного поля, которые характерны для хромосферы. Напротив, в SOL17-05-2012 взаимодействие ускоренных электронов происходило преимущественно в условиях короны.

Импульсная вспышка X6.9 SOL2011-08-09 сопровождалась γ -излучением >100 МэВ, которое

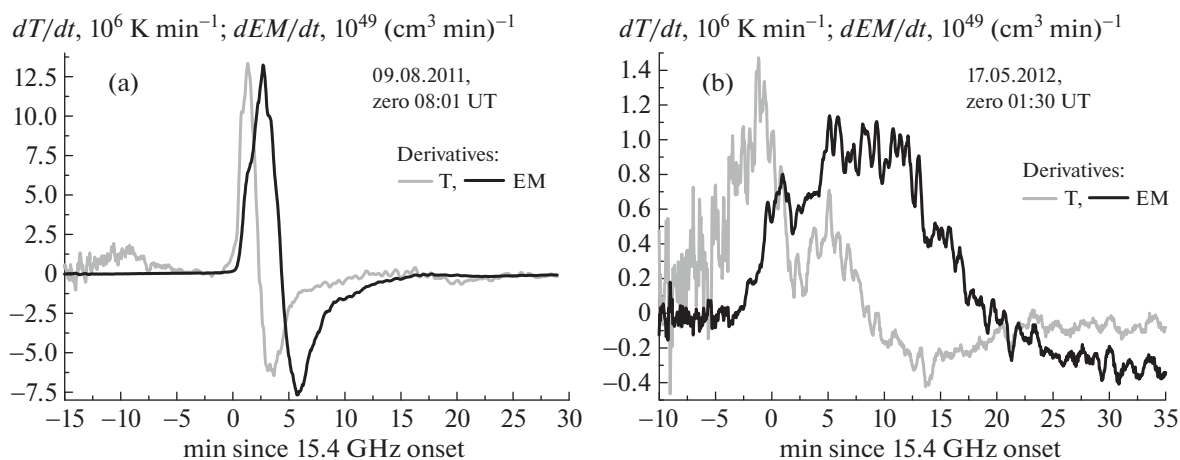


Рис. 3. Сглаженные производные температуры (серые кривые) и меры эмиссии (черные кривые) вспышечной плазмы для событий: (а) 9 августа 2011 г. и (б) 17 мая 2012 г.

было зарегистрировано FermiGRO/LAT (Ackerman et al., 2014 [4], Share et al., 2017 [5]) только в течение 3.3 мин после 08:01 UT (0 времени в нашей шкале). В период вспышки M5.1 SOL2012-05-17 (01:30–02:10 UT) КА FermiGRO был в неблагоприятном положении для наблюдения Солнца, но солнечное γ -излучение >100 МэВ регистрировалось LAT на трех последующих орбитах FermiGRO более трех часов (02:10–05:20 UT) (Ackerman et al., 2014 [4], Share et al., 2017 [5]). Эти наблюдения γ -излучения >100 МэВ находятся в качественном согласии с нашими оценкам инжекции протонов в МП (начала, интенсивности и длительности), которые обсуждались в предыдущем разделе.

4. УСКОРЕНИЕ КВМ В ЭРУПТИВНЫХ ВСПЫШКАХ

Первое появление КВМ в поле зрения коронографа LASCO C2 согласно каталогу в SOL2011-08-09 было на (+11) мин и на $R_S + d = 3.01 R_S$, а в SOL2012-05-17 на (+18) мин и на $R_S + d = 3.61 R_S$ (табл. 1, рис. 2d), где d – расстояние от поверхности Солнца. Двумя способами можно грубо оценить необходимые величины ускорения КВМ a :

1) зная d , $a = 2d/t_1^2$ или 2) используя среднюю скорость (табл. 1), $a = V_{cp}/t_1$. Получаем 6.4 и 2.4 км/с² для SOL2011-08-09 и 3.1 и 1.5 км/с² для SOL2012-05-17 соответственно. Полученный разброс величин ускорения показывает, что необходимо учитывать динамику КВМ на расстояниях, близких к Солнцу (в поле зрения LASCO C2), исследовать взаимозависимость процессов во вспышках и ускорения КВМ.

Для оценки положения КВМ до его появления в поле зрения LASCO C2 мы воспользуемся

методом сшивки (Струминский и др., 2021 [15]) предполагаемого равноускоренного движения и наблюдаемого равномерного движения КВМ (с точностью до скважности измерений). Предположим, что КВМ начинает двигаться из положения $R_0 = 1.25 R_S$ в момент t_0 с начальной скоростью $V_0 = 0$ и ускорением $a = \text{const}$ до момента t . После момента t до положения R КВМ движется со скоростью $V = \text{const}$, которая известна из наблюдений коронографа LASCO. Линейная аппроксимация положений КВМ в различные моменты наблюдений – это $R(t) = A + Bt$. Тогда сшивка предполагаемого равноускоренного и наблюдаемого равномерного движений будет $R = A + Bt$, при $B = V_{12}$, где величина ускорения на отрезке времени $t - t_0$ будет $a_1 = B/(t - t_0)$. Нижние индексы у V обозначают, какие из последовательных положений КВМ в поле зрения LASCO C2 были использованы для линейной экстраполяции (первое и второе (1 и 2), или второе и третье (2 и 3)). Из этих условий сшивки находим, что $t = (2R_0 - 2A - Bt_0)/B$.

Мы обращаем внимание на то, что в обоих событиях различаются скорости ($V_{23} > V_{12}$), и это различие значимое, т.е. КВМ должны были ускоряться до момента t_3 (до третьего положения). Оценка величины ускорения между моментами t и t_3 будет $a_2 = (V_{23} - V_{12})/(t_3 - t) < a_1$. Средние величины ускорений будут $a_{cp1} = V_{12}/(t_2 - t_0)$ и $a_{cp2} = V_{23}/(t_3 - t_0)$. Результаты вычислений представлены в табл. 2. Величины a_2 для рассматриваемой пары событий оказались примерно одинаковые.

Также для сравнения в табл. 2 приведена величина скорости КВМ на $20 R_S$, V_{20Rs} , взятая нами из каталога LASCO. Отметим, что в обоих случаях $V_{20Rs} < V_{23}$, и с учетом разницы в скорости и во времени (V_{20Rs} и t_3) величины V_{23} оказались примерно

Таблица 2. Характерные времена (относительно начала радиоизлучения на 15.4 ГГц), скорости и ускорения КВМ. Пояснения даны в тексте

Событие	t_0 [с]	A [км]	$V_{12} = B$ [км/с]	t [с]	t_2 [с]	$a_1(a_{cp1})$ [км/с ²]	t_3 [с]	V_{23} [км/с]	$a_2(a_{cp2})$ [км/с ²]	V_{20R_s} [км/с]
09.08.2011	-60	629439	2202	278	1387	6.5(1.5)	1746	2599	0.3 (1.4)	1506
17.05.2012	-60	606627	1757	360	1806	4.2(0.9)	2165	2288	0.3 (1.0)	1473

одинаковыми для наших событий. Это означает, что КВМ тормозились по мере распространения до $20 R_s$, и на них действовали близкие по величине результирующие силы после момента t_3 и на расстояниях $\sim 6-7 R_s$. Изменение знака ускорения говорит о том, что принципиально изменились условия распространения – силы, действующие на КВМ, стали другими. Возможно, именно на расстоянии от Солнца $>6-7 R_s$ проходит граница между активной короной и свободно распространяющимся солнечным ветром.

Сравним наши результаты по ускорению КВМ, указанные в табл. 2, с оценками других авторов. Согласно Gopalswamy et al., 2013 [13], КВМ в SOL09-08-2011 ускорился со средней величиной ускорения $a = 1.56 \text{ км/с}^2$ до достижения скорости $V = 2496 \text{ км/с}$ в 08:12 UT (+11 мин), а в SOL17-05-2012 ускорение было со средней величиной $a = 1.77 \text{ км/с}^2$ до скорости $V = 1997 \text{ км/с}$, достигнутой в 01:48 UT (+18 мин). В работе Gopalswamy et al., 2016 [37] приведены уже другие значения для этих же событий, которые соответствуют ускорению КВМ от начала HXR вспышки в 07:59 UT (-2) мин до ее максимума в 08:05 UT (+4) мин с величиной $a = 6.93 \text{ км/с}^2$ до скорости $V = 2496 \text{ км/с}$. Для SOL17-05-2012 от момента 01:25 (-5) мин до 01:47 UT (+17) мин с $a = 1.51 \text{ км/с}^2$ до $V = 1997 \text{ км/с}$. Таким образом, оценка ускорения КВМ в работе Gopalswamy et al., 2016 [37] для SOL09-08-2011 близка к нашей. Для SOL17-05-2012 наша оценка величины a превышает результаты Gopalswamy et al., 2013 [13], Gopalswamy et al., 2016 [37] ~ в 2 раза.

5. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Для каждого выбранного события были рассмотрены имеющиеся наблюдения потоков солнечных релятивистских электронов и протонов $>100 \text{ МэВ}$; солнечного γ -излучения (FermiLAT), HXR (ACS SPI) и SXR (GOES) излучений, и радиоизлучения (15.4 ГГц и 245 МГц, RSTN). Скорости КВМ были определены по данным LASCO C2: V_{12} – по первому и второму; V_{23} – по второму и третьему положениям в поле зрения коронографа. Средние скорости V_{cp} были рассчитаны по всем данным LASCO C2 и C3. Далее из условия сшивки в момент t предполагаемого равноуско-

ренного движения и наблюдаемого равномерного движения КВМ с V_{12} или V_{cp} находились значения: величина ускорения a , моменты начала t_0 и конца t ускорения. Соотношение между скоростями $V_{12}(t_2)$, $V_{23}(t_3)$ и V_{cp} позволило нам судить о динамике КВМ после момента t .

Согласно работам Švestka, 1995 [23], Švestka, 2001 [38], КВМ является неотъемлемой частью всех эруптивных вспышек, независимо от наличия или отсутствия хромосферных эффектов. При этом сами эруптивные вспышки различаются диапазоном высот протекающих процессов, т.е. максимальной величиной магнитного поля.

Так как $a \sim V_A^2 = B^2/4\pi\rho$, то скорость подъема КВМ в эруптивных вспышках зависит от величины магнитного поля B и плотности ρ (т.е. от эффективности “хромосферного испарения”). Понятно, что одинаковые величины скорости Альвена и ускорения КВМ могут быть достигнуты при разных соотношениях между B и ρ . Вопрос о различии КВМ, зародившихся в сильных или слабых магнитных полях (т.е. КВМ, связанных с хромосферными вспышками или нет) является ключевым в понимании природы КВМ, согласно работе Švestka, 2001 [38].

Рассмотренные вспышки X6.9 9 августа 2011 г. и M5.1 17 мая 2012 г. с сильными или слабыми хромосферными эффектами (изменениями T и EM), соответственно, показывают, что сопровождавшие их КВМ различались динамикой ускорения при практически равных средних скоростях. Событие SOL2011-08-09 является хорошим примером, когда импульсное ускорение КВМ совпадает по времени с ярко выраженной импульсной фазой – всплесками нетеплового излучения, нагревом плазмы и ростом EM за счет хромосферного испарения. Вероятно, плотная и горячая плазма, находящаяся в условиях сильного магнитного поля, сообщает больший дополнительный импульс КВМ (эффект паруса).

Фактически, первая инжекция протонов 500 МэВ на (+4) ± 1 мин должна была происходить при положении КВМ на (1.52–1.85) R_s в SOL09-08-2011 и на (1.42–1.64) R_s в SOL17-05-2012. Как было отмечено в разделе 2, по данным ACS SPI первые протоны GLE пришли на Землю позднее (+10) мин. В момент их выхода фронт

КВМ располагался на расстоянии $>2.32 R_S$ (Gopalswamy et al., 2013 [13]). Наш результат для первых пришедших протонов не противоречит теоретическим представлениям (Бережко и Танеев, 2003 [39]), что для эффективного ускорения сферической ударной волной ее радиус должен быть в пределах $\sim 2.0-3.0 R_S$. Это согласуется с выводом (Li et al., 2013 [29]). Однако остается вопрос, где в этом случае должны были ускоряться те протоны, которые пришли значительно позднее? Поздние времена соответствуют сильно большим расстояниям фронта КВМ от Солнца, где уже нет условий для эффективного ускорения протонов ударной волной, согласно (Бережко и Танеев, 2003 [39]). Альтернативой ускорению протонов на ударной волне является их стохастическое ускорение во вспышках на продолжительной пост-эруптивной фазе. Наблюдения потоков релятивистских электронов в МП непосредственно указывают на последний вариант.

Таким образом, для выбранных событий, связанных с эруптивными вспышками X6.9 9 августа 2011 г. и M5.1 17 мая 2012 г., показано:

1) Максимальные интенсивности и флюенсы СКЛ в МП не коррелировали с характеристиками КВМ, теплового и нетеплового излучения. Наибольшие потоки СКЛ наблюдались в МП в событии, связанном со вспышкой M5.1 17 мая 2012 г. с меньшими интенсивностями, но с большей длительностью ЭМ излучения. Длительности солнечного γ -излучения >100 МэВ и функции инжекции протонов в МП отражают временные свойства вспышек, а не КВМ.

2) Вблизи Земли наблюдалось подобие временных профилей потоков солнечных электронов >1 МэВ и протонов >100 МэВ. По теоретическим представлениям (Miller et al. 1997 [8]) только стохастический механизм ускорения способен длительно ускорять электроны ~ 10 МэВ и протоны ~ 100 МэВ. Поэтому это подобие свидетельствует о стохастическом механизме ускорения частиц во вспышках (во множестве элементарных актов с длительностью много меньше всего процесса ускорения) на фоне развития КВМ.

3) КВМ, связанный с постепенной вспышкой M5.1 SOL2012-05-17 со слабыми хромосферными эффектами, ускорялся более длительное время и с меньшей величиной ускорения. Нетепловые электроны взаимодействовали с плазмой меньшей плотности и магнитным полем меньшей величины, чем в SOL2011-08-09.

4) КВМ, связанный с импульсной вспышкой X6.9 в SOL2011-08-09 с сильными хромосферными эффектами, ускорялся с максимальной величиной ускорения во время эффективного хромосферного испарения от момента T_{\max} до момента EM_{\max} .

5) Максимальные скорости КВМ (2300–2600 км/с) наблюдались вблизи нижней границы поля зрения LASCO C2 ($\sim 2 R_S$) и соответствовали, по всей видимости, величинам скорости Альвена в короне над активной областью (Струминский и др., 2021 [15]).

6) Величины скорости КВМ ($\sim 1500-1600$ км/с), найденные с помощью линейной аппроксимацией всех положений КВМ в поле зрения LASCO (C2 + C3), включая расстояние $20 R_S$, были достигнуты в результате замедления на $R_S > 6$.

Из сравнения характеристик ЭМ-излучения вспышек, КВМ и СКЛ на масштабе времени от нескольких минут до нескольких часов (после начала наблюдения нетеплового излучения в M5.1 и X6.8) следует, что длительность вспышечных процессов, а не их наблюдаемая интенсивность, определяла свойства КВМ и СКЛ. Более длительный и более интенсивный выход солнечных протонов в МП в событии M5.1, по сравнению с X6.8, был обусловлен развитием вспышки только в короне (без явного “хромосферного испарения” — изменений температуры $(dT/dt)_{M5.1} < (dT/dt)_{X6.8}$ и меры эмиссии $(dEM/dt)_{M5.1} < (dEM/dt)_{X6.8}$), движением КВМ с меньшей величиной ускорения ($a_{1705} < a_{0908}$) и, соответственно, с большей длительностью $t_{M5.1} = V_{M5.1}^{\max}/a_{M5.1} > V_{X6.8}^{\max}/a_{X6.8} = t_{X6.8}$ для достижения максимальной скорости.

Более длительное ускорение КВМ предполагает и более длительные процессы энерговыделения (ускорения) на фазе спада вспышки. Эти процессы происходили в системе высоких после-вспышечных петель при плотностях плазмы и величинах магнитного поля недостаточных для генерации жесткого рентгеновского и микроволнового излучения выше порога регистрации современных приборов. О том, что энерговыделение все же имело место, свидетельствовали только длительное γ -излучение, зарегистрированное FermiLAT, и продолжающееся ускорение КВМ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность участникам наземных и космических миссий, данные которых находятся в открытом доступе и были использованы в работе (ACS SPI, GOES, SOHO/EPHIN, RSTN, RHessi, и SOHO/LASCO).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа была поддержана субсидиями по темам “Многоволновое активное Солнце” (ИЮГ, ГАО РАН) и “Плазма” (АБС, ИКИ РАН).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *L. M. Green, T. Török, B. Vršnak, W. Manchester, and A. Veronig*, *Space Sci. Rev.* **214**, id. 46 (2018).
2. *Л. И. Мирошниченко*, *Успехи физических наук* **188**, 34 (2018).
3. *E. L. Chupp, D. J. Forrest, J. M. Ryan, J. Heslin, et al.*, *Astrophys. J.* **263**, L95. (1982).
4. *M. Ackermann, M. Ajello, A. Albert, A. Allafort, et al.*, *Astrophys. J.* **787**, id. 15 (2014).
5. *G. H. Share, R. J. Murphy, S. M. White, A. K. Tolbert, B. R. Dennis, R. A. Schwartz, D. F. Smart, M. A. Shea*, *Astrophys. J.* **869**, 182 (2018).
6. *E. W. Cliver, S. W. Kahler, M. Kazachenko, M. Shimojo*, *Astrophys. J.* **877**, id.11 (2019).
7. *А. Б. Струминский, И. Ю. Григорьева, Ю. И. Логачев, А. М. Садовский*, *Физика плазмы* **46**, 139 (2020).
8. *J. A. Miller, P. J. Cargill, A. G. Emslie, G. D. Holman, et al.*, *J. Geophys. Res.* **102**, 14631 (1997).
9. *N. Gopalswamy*, *Geoscience Lett.* **3**, 8 (2016).
10. *Б. П. Филиппов*, *Успехи физических наук* **189**, 905 (2019).
11. *J. Zhang, K. P. Dere, R. A. Howard, M. R. Kundu, and S. M. White*, *Astrophys. J.* **559**, 452 (2001).
12. *P. T. Gallagher, G. R. Lawrence, and B. R. Dennis*, *Astrophys. J.* **588**, L53 (2003).
13. *N. Gopalswamy, H. Xie, S. Akiyama, S. Yashiro, I. G. Usoskin, J. M. Davila*, *Astrophys. J.* **765**, id. L30 (2013).
14. *T. Gou, A. M. Veronig, R. Liu, B. Zhuang, et al.*, *Astrophys. J.* **897**, id. L36 (2020).
15. *А. Б. Струминский, И. Ю. Григорьева, Ю. И. Логачев, А. М. Садовский*, *Геомагнетизм и аэронаука* **61**, 683 (2021).
16. *J. P. Wild, S. F. Smerd, A. A. Weiss*, *Annual Rev. Astron. and Astrophys.* **1**, 291 (1963).
17. *R. Ramaty, S. A. Colgate, G. A. Dulk, P. Hoyng, J. W. Knight III, R. P. Lin, D. B. Melrose, C. Paizic, F. Orrall, P. R. Shapiro*, in *Proc. of the 2nd SkyLab Workshop on Solar Flares*, edited by P. A. Sturrock, chap. 4, 117 (1978).
18. *A. Y. Shih, R. P. Lin, and D. M. Smith*, *Astrophys. J.* **698**, 1152 (2009).
19. *P. A. Sturrock, B. Coppi*, *Astropys. J.* **143**, 3 (1966).
20. *R. Pallavicini, S. Serio, G. S. Vaianai*, *Astropys. J.* **216**, 108 (1977).
21. *J. Gosling*, *J. Geophys. Res.*, **98**, 18937 (1993).
22. *Z. Švestka*, *Sol. Phys.* **160**, 53 (1995).
23. *H. Hudson, B. Haisch, K. T. Strong*, *J. Geophys. Res.* **100**(A3), 3473 (1995).
24. *Z. Švestka, E. W. Cliver*, *IAU Coll. 123, Lecture Notes in Physics* **399**, 1 (1992).
25. *И. Ю. Григорьева, А. Б. Струминский, А. Н. Шаховская*, *Геомагнетизм и аэронаука* **60**, 710 (2020).
26. *А. В. Struminsky, Yu. I. Logachev, I. Yu. Grigorieva, A. M. Sadovskii*, *Geomagnetism and Aeronomy* **60**, 1057 (2020).
27. *D. A. Guidice, E. W. Cliver, W. R. Barron, S. Kahler*, *Bull. American Astron. Soc.* **13**, 553 (1981).
28. *И. Н. Шарыкин, А. Б. Струминский, И. В. Зимовец*, *Письма в Астрон. журн.* **41**, 57 (2015).
29. *C. Li, A. Kazi, L. Firoz, P. Sun, L. I. Miroshnichenko*, *Astrophys. J.* **770**, id. 34 (2013).
30. *N. Gopalswamy, S. Yashiro, G. Michalek, G. Stenborg, A. Vourlidas, S. Freeland, R. Howard*, *Earth, Moon and Planet* **104**, (2009).
31. *R. Müller-Mellin, H. Kunow, V. Fleißner, E. Pehlke, et al.*, *Sol. Phys.* **162**, 483 (1995).
32. *А. Б. Струминский, И. Ю. Григорьева, Ю. И. Логачев, А. М. Садовский*, *Астрофизика* **63** (3), 437 (2020).
33. *А. Б. Струминский, И. Ю. Григорьева, Ю. И. Логачев, А. М. Садовский*, *Известия РАН: Серия физическая* **85**(8), 1180 (2021).
34. *А. Б. Струминский*, *Астрон. журн.* **80**, 992 (2003).
35. *A. Struminsky*, *J. of Physics: Conference Series* **409**, 012148 (2013).
36. *А. Б. Струминский*, *Известия РАН: Серия физическая* **83**(5), 1180 (2019).
37. *N. Gopalswamy, S. Yashiro, N. Thakur, P. Mäkelä, H. Xie, S. Akiyama*, *Astrophys. J.* **833**, 216 (2016).
38. *Z. Švestka*, *Space Science Rev.* **95**, 135 (2001).
39. *Е. Г. Бережко, С. Н. Танеев*, *Письма в Астрон. журн.* **29**, 601 (2003).