

УДК 537.591.5

ДЛИТЕЛЬНЫЕ СЛАБЫЕ ВСПЫШКИ С1.2: ИСТОЧНИК ПРОТОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ

© 2020 г. И. Ю. Григорьева^{1, *}, А. Б. Струминский², А. Н. Шаховская³

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

²Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН),
г. Москва, Россия

³Крымская астрофизическая обсерватория РАН (КрАО РАН),
пгт. Научный, Республика Крым, Россия

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

Поступила в редакцию 04.03.2020 г.

После доработки 02.05.2020 г.

Принята к публикации 21.05.2020 г.

Проведен анализ двух протонных событий (>100 МэВ; GOES, ACS SPI), связанных со слабыми вспышками (С1.2, GOES класс) в мягком рентгеновском диапазоне, произошедшими 26 ноября 2011 г. и 29 сентября 2013 г. Эти события сопровождались значительными потоками релятивистских электронов (>1 МэВ; SOHO EPNIN) в межпланетном пространстве. Временные профили потоков этих протонов и электронов были подобны на фазе роста и свидетельствовали в пользу их общего механизма ускорения и распространения. Постепенный рост интенсивностей потоков, по нашему мнению, показывает длительную и постепенную инжекцию частиц в межпланетное пространство, которая может являться результатом продолжительного ускорения или захвата. Так как продолжительный захват электронов маловероятен, то, скорее всего, имело место длительное ускорение. Длительное ускорение протонов реализуется на постэруптивной фазе солнечных вспышек или на ударной волне коронального выброса массы. Согласно существующим теоретическим представлениям ускорение солнечных электронов до ~ 10 МэВ ударной волной вряд ли возможно. В таком случае релятивистские электроны и протоны укорялись, по-видимому, на постэруптивной фазе солнечных вспышек, где наиболее вероятным механизмом считается стохастическое ускорение МГД-турбулентностью.

DOI: 10.31857/S0016794020060061

1. ВВЕДЕНИЕ

Обычно возрастания интенсивности солнечных космических лучей (СКЛ, электронов и протонов) в межпланетном пространстве (МП) наблюдаются во время и после мощных солнечных вспышек, регистрируемых в мягком рентгеновском (SXR-) диапазоне космическими аппаратами (КА) серии GOES (the *Geostationary Operational Environmental Satellite*) [Belov et al., 2007]. С одной стороны, это свидетельствует об ускорении электронов и протонов во вспышке, а с другой стороны, по мнению авторов работ [Kahler, 1982; Cliver et al., 2019], является так называемым “синдромом большой вспышки”, когда электроны ускоряются во вспышке, а протоны – на ударной волне коронального выброса массы (КВМ).

Форма временных профилей интенсивности протонов >100 МэВ, например, регистрируемых детекторами КА GOES, определяется эффектами их инжекции в МП и распространения до наблю-

дателя. При этом на фазе роста интенсивности протонов до максимума преимущественную роль играет инжекция, а на фазе спада – распространение. Во многих случаях фазу роста удавалось объяснить [Struminsky, 2003, 2013; Струминский, 2003], предполагая длительную и переменную инжекцию протонов в МП, и в том числе, когда интенсивность SXR-излучения относительно его максимума мала. Для объяснения длительной фазы спада SXR-излучения можно предположить продолжающиеся процессы ускорения электронов в атмосфере Солнца. Таким образом, не исключена возможность одновременного ускорения электронов и протонов на постэруптивной фазе.

Если это так, то для уточнения сценария ускорения энергичных частиц, регистрируемых в МП, нужно рассматривать протонные события, связанные непосредственно с самыми слабыми SXR-вспышками, произошедшими на диске (см.

каталог протонных событий <https://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/>). Следует отметить случай регистрации гамма-излучения от распада π^0 -мезонов в C3.7-вспышке [Share et al., 2018].

В каталоге нами было найдено два события, связанных со вспышками балла C1.2, которые в настоящий момент являются наименьшими, а именно, события 26 ноября 2011 г. в активной области (АО) 11353, согласно отчету *the Space Weather Prediction Center of the National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) и 29 сентября 2013 г. вне АО. Они и являются предметом нашего исследования с целью поиска дополнительных свидетельств в пользу того или иного механизма ускорения солнечных протонов и электронов.

Некоторые из свойств отобранных двух вспышек были характерны для протонных вспышек: 1) продолжительное SXR-излучение (GOES); 2) массивный KBM типа гало (KA SOHO LASCO); 3) радиоизлучение III-типа на 25–180 МГц (KA Wind WAVES) и прерывистый II-тип, распространяющийся далеко в МП. Однако проявления на микроволнах по данным *the Radio Solar Telescope Network* (RSTN) [Guidice et al., 1981] и в жестком рентгене, полученные на КА RHESSI и ИНТЕГРАЛ (ACS SPI), на первый взгляд, не превышали фона. Эти вспышки, по всей видимости, обладали невыраженной импульсной фазой [Григорьева и др., 2019] и не укладываются в “главную последовательность” на диаграмме взаимосвязи потока протонов и характеристик вспышек в работах [Grechnev et al., 2013, 2015; Cliver, 2016; Cliver et al., 2019]. Вспышки со слабой импульсной фазой в микроволновом (MW-)излучении и большими потоками протонов в МП рассматривались ранее (см., например, [Daibog et al., 1993] и ссылки там же).

Согласно теоретическим представлениям, которые обсуждаются в обзоре [Miller et al., 1997], возможность ускорять электроны ~ 10 МэВ и протоны >100 МэВ является ключевым свойством, которое и позволяет определить механизм ускорения. Информацию о спектре электронов ~ 10 МэВ можно получить, интерпретируя рентгеновское, гамма- и радиоизлучение Солнца, но эта задача пока не решена. И нет возможности принципиально иметь информацию о протонах диапазона 30–300 МэВ (т.е. между протонами, генерирующими ядерные гамма-линии и π^0 -мезоны). Поэтому необходимо исследовать солнечные энергичные частицы, распространяющиеся в МП.

По всей видимости, длительные вспышки с невыраженной импульсной фазой сопровождаются потоками релятивистских электронов ~ 10 МэВ и протонов >100 МэВ с подобными временными профилями [Струминский и др., 2019], что указывает на их длительное стохастическое ускорение в атмосфере Солнца [Струминский

и др., 2020]. Эти характеристики возрастных интенсивности солнечных электронов и протонов в МП будут проверены ниже для событий 26 ноября 2011 г. и 29 сентября 2013 г. В разделе 2 описаны используемые детекторы частиц и доступный наблюдательный материал для исследуемых событий. В разделе 3 сформулированы результаты наблюдений. В разделе 4 обсуждается проблема ускорения солнечных протонов и релятивистских электронов и сделаны выводы.

2. ИНСТРУМЕНТЫ И МЕТОДЫ

Для решения поставленной задачи мы используем данные детекторов протонов и электронов, установленных на КА вне магнитосферы Земли.

Антисовпадательная защита спектрометра на КА ИНТЕГРАЛ (ACS SPI) регистрирует протоны с энергией >100 МэВ и фотоны с энергией >150 кэВ. Это интегральный и некалиброванный детектор, который обладает большой площадью (3000 см^2) и высокой временной разрешающей способностью (50 мс) [Schanne, 2002; Schanne et al., 2002]. Данные ACS SPI находятся в свободном доступе на сайте (<http://isdc.unige.ch/~savchenk/spiacs-online/spiacs.pl>). Фоновый счет ACS SPI определяется интегральным потоком галактических космических лучей >100 МэВ $0.1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ и составлял около 4100 импульсов за 50 мс перед рассматриваемыми событиями. Дополнительные потоки протонов и фотонов над фоновым счетом прибора могут быть определены с высокой статистической точностью. Так, при усреднении за 1 мин (1200 точек) получаем статистическую ошибку 2218 имп/мин или 0.05%, т.е. при сглаживании данных ACS SPI за 1 мин возрастания над фоном >2 отсчетов за 50 мс или $5 \times 10^{-5} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ будут значимыми. На рисунках 1а, 1б для рассматриваемых событий приведены значения темпа счета ACS SPI за 50 мс с вычтенным фоном и сглаженные скользящим средним за 1 мин. Детектор ACS SPI примерно на три порядка чувствительнее детектора GOES, сейчас на орбите Земли нет стандартных протонных детекторов с такой чувствительностью [Струминский и др., 2020].

В настоящее время единственным детектором, регистрирующим на орбите Земли электроны с энергией >1 МэВ, является *the Electron Proton Helium Instrument* (EPHIN) [Müller-Mellin et al., 1995] на борту КА *the Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO), который находится в точке Лагранжа L1. Данные по потокам релятивистских электронов в каналах 0.27–0.7, 0.67–3.0 и 2.64–10.4 МэВ находятся в открытом доступе на странице <http://www2.physik.uni-kiel.de/SOHO/phpeph/EPHIN.htm>. Отношение скорости электронов к скорости света V/c соответственно находится в пределах 0.78–0.91, 0.91–0.99, 0.99. Если путь,

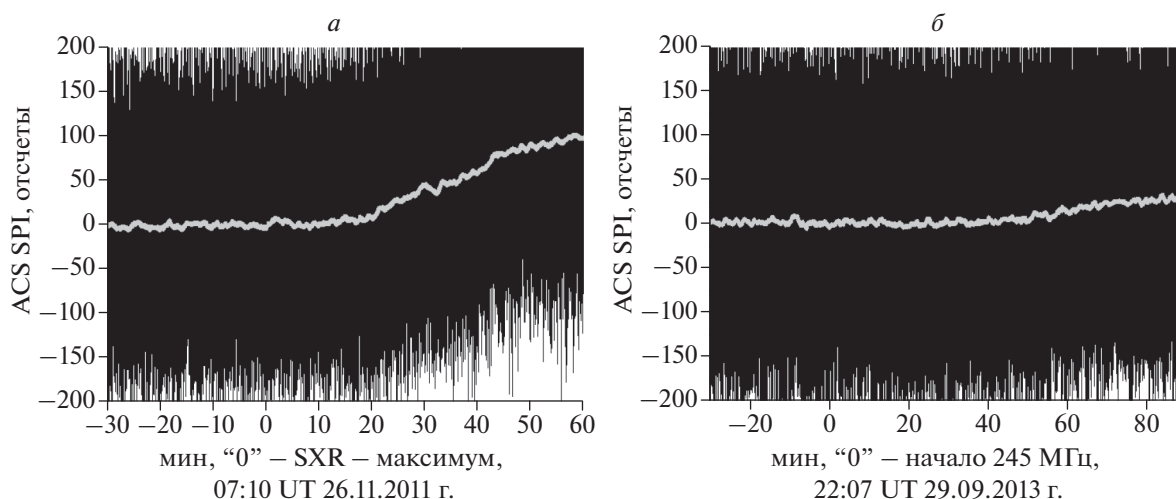


Рис. 1. Темп счета ACS SPI в событиях 26.11.2011 г. (а) и 29.09.2013 г. (б). Черная кривая – темп счета с вычтенным фоном ((а) – 4144 и (б) – 4079 отсчетов за 50 мс); светло-серая кривая – сглаженные средние за 1 мин (1200 точек) данные черной кривой. Шкалы: слева по оси Y – темп счета ACS SPI; внизу по оси X – время в UT мин, с началом “0” (а) – в максимуме SXR-излучения (GOES, 07:10 UT) и (б) – в момент регистрации 245 МГц (RSTN, 22:07 UT).

пройденный частицами, равен минимальной длине силовой линии магнитного поля (т.е. ~ 1.2 а.е.), то время запаздывания электронов в дифференциальных каналах относительно электромагнитного излучения будет $\sim 4, 3$ и 2 мин, соответственно. Такое предположение соответствует предельному случаю распространения частиц вдоль силовой линии без рассеяния. Данные интегральных протонных каналов GOES доступны на сайте (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/NOAA/particle/). Для протонов с энергиями 10, 100 и 500 МэВ ($V/c = 0.15, 0.43$ и 0.76) время запаздывания будет при таких же предположениях $\sim 58, 15$ и 5 мин, соответственно.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассматриваемые вспышки показали постепенный рост вспышечного SXR-излучения до максимального значения за 61 и 116 мин, соответственно. По данным *the Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager* (KA RHESSI) [Lin et al., 2002], представленным в открытом доступе, видно, что жесткое рентгеновское (HXR)-излучение в событии 26 ноября 2011 г. регистрировалось лишь в каналах 3–6 кэВ и 6–12 кэВ. В событии 29 сентября 2013 г. на фазе SXR-роста HXR-излучение было на уровне фона, а в SXR-максимуме RHESSI был на ночной стороне.

В обоих событиях регистрировались проявления в ультрафиолете (УФ) и крайнем УФ по данным *the Atmospheric Imaging Assembly* (AIA) [Lemen et al., 2012] на борту *the Solar Dynamic Observatory* (SDO) и эрупция волокна, видимая в линии H- α

(*Kanzelhöhe Observatory*). Более того, вспышечное событие 29 сентября 2013 г. было связано именно с диссипацией волокна [Cliver et al., 2019], видимого вне АО на диске Солнца. Слабые, менее 10 с.е.п. (солнечные единицы потока 1 с.е.п. = 10^{-22} Вт m^{-2} Гц $^{-1}$) значения в MW-диапазоне (RSTN) можно обнаружить в обеих вспышках.

В рассматриваемых событиях можно предположить наличие невыраженной импульсной фазы [Григорьева и др., 2019], но без видимых проявлений в нетепловом излучении, что, возможно, связано с ускорением электронов в областях с низкой плотностью вещества и слабым магнитным полем. Действительно, значительными были проявления исследуемых событий в короне и в МП, где наблюдались ДН-метровые радиовсплески II-III типов (KA *Wind Waves*), быстрые гало KBM (см. данные каталога SOHO LASCO CME CATALOG на сайте: cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/) и солнечные релятивистские электроны (SOHO EPHIN) и протоны (GOES, ASC SPI).

3.1. Вспышка C1.2 26.11.2011 и связанное с ней протонное событие

На рисунке 2 показан временной профиль SXR-излучения (GOES) во вспышке C1.2, произошедшей 26 ноября 2011 г., а также аппроксимация положения KBM в различные моменты времени по данным SOHO LASCO. За “0” было взято время SXR-максимума (07:10 UT), выбор “0” был произвольным. Формальное начало вспышки в 06:09 UT находится вне временной шкалы рисунка. Возрастание, видимое на кривых после (+50) мин, относится к событию в другой АО, но

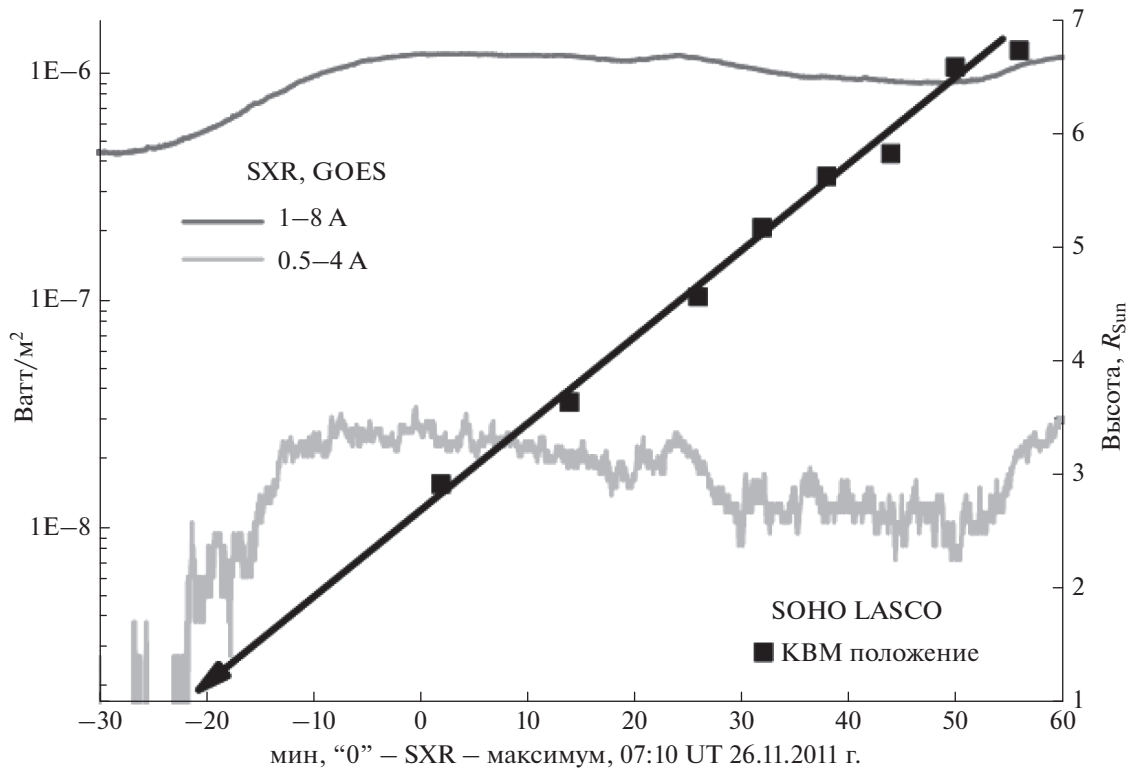


Рис. 2. Сравнение временного профиля вспышечного SXR-излучения в каналах 0.5–4 Å (светло-серая кривая) и 1–8 Å (серая кривая) по данным GOES в событии 26.11.2011 г. с аппроксимацией положения связанного со вспышкой КВМ (SOHO LASCO C2, черные квадраты) на момент его старта (черная прямая). Шкалы: слева по оси Y – SXR-поток в логарифмах, справа – высота фронта КВМ от центра диска в солнечных радиусах; внизу по оси X – время в UT минутах, с началом “0” в максимуме SXR-излучения (GOES, 07:10 UT).

определяет формальный конец вспышки в 07:59 UT. Возрастание SXR-потока в высокоэнергичном канале GOES (0.5–4 Å) началось на (–23 мин) и связано по времени с началом подъема КВМ, т.е. импульсная и постэруптивные фазы вспышки совпали по времени.

Солнечные события происходили 26 ноября 2011 г. в АО NOAA 11353, которая располагалась на диске с координатами N11W47, что благоприятно для прихода солнечных космических лучей к Земле. На рисунке 3 показаны временные профили потоков релятивистских электронов (SOHO ERNIN) и темпа счета детектора ACS SPI. Первое небольшое возрастание темпа счета ACS SPI (светло-серая кривая) с максимумом в “0”, по-видимому, вызвано HXR-излучением >150 кэВ, интенсивность которого была ниже чувствительности детекторов RHESSI. Релятивистские электроны взаимодействовали в атмосфере Солнца в районе “0” мин в нашей временной шкале. Не исключено, что отрыв КВМ явился результатом развития неустойчивости, вызванной нагревом плазмы этими ускоренными электронами.

Возрастание потока электронов над фоном в канале 0.27–0.7 МэВ детектора ERNIN началось

примерно на (+10) мин, в канале 0.67–3.0 МэВ после (+15) мин, а слабое возрастание в канале 2.64–10.4 МэВ зарегистрировано после (+25) мин. Эти электроны ускорились на постэруптивной фазе вспышки и выходили в МП на (+6) и (+12) мин, соответственно.

Второе возрастание темпа счета детектора ACS SPI около (+10) мин, мы интерпретируем как начало протонного возрастания (см. рис. 3). Если первыми пришли протоны 100 МэВ/500 МэВ, то они должны были выйти в МП на (–5)/(+5) мин. Временной профиль ACS SPI (светло-серая кривая) подобен профилям потока электронов SOHO ERNIN (пустые квадраты и кружки) и свидетельствует о длительном ускорении протонов на постэруптивной фазе вместе с электронами [Струминский и др., 2020].

Как видно на рис. 4a, протонное событие 26 ноября, зарегистрированное GOES > 10 МэВ, началось примерно через час после “0” (см. черные кривые) и достигло максимума спустя 15 ч. Протоны 10 МэВ должны были выйти в МП не ранее “0”-мин. Задержанный максимум потока протонов >10 МэВ, возможно, был связан с их удержанием за фронтом КВМ, которое привело к

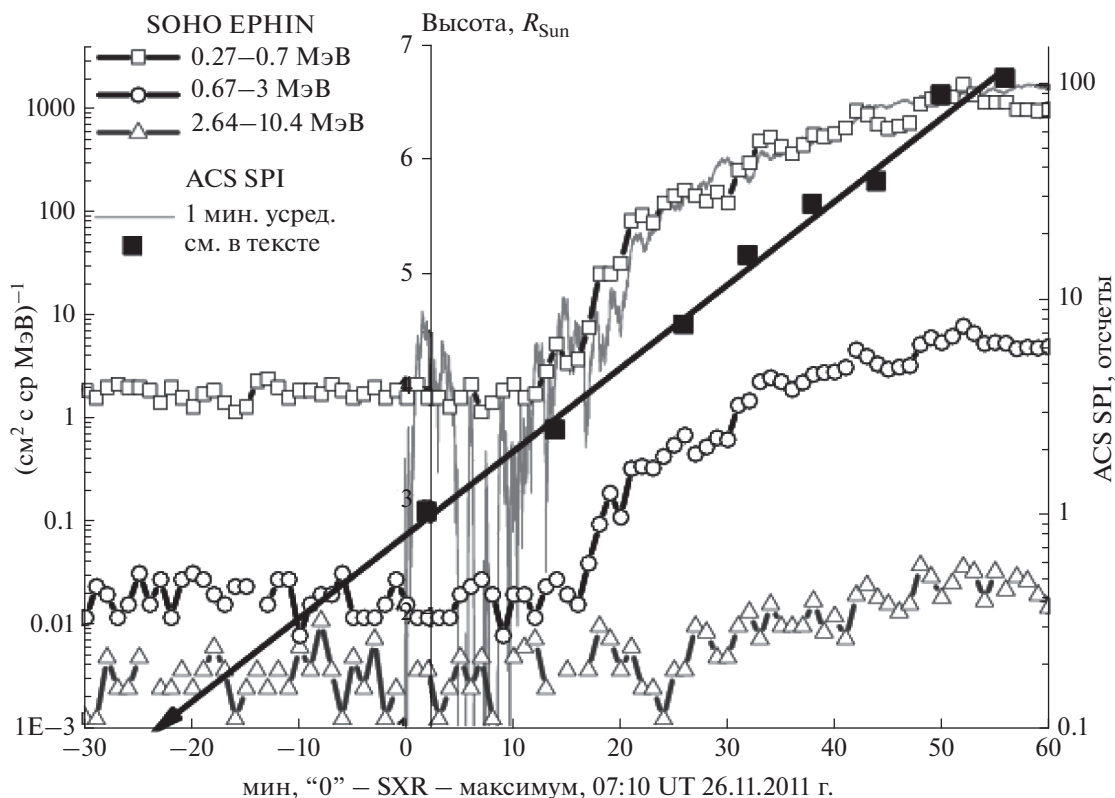


Рис. 3. Сравнение временных профилей потоков солнечных электронов в трех каналах SOHO EPHIN (пустые квадраты, кружки и треугольники, соответственно) в событии 26.11.2011 г. с темпом счета ACS SPI (светло-серая кривая – сглаженные средние за 1 мин данные, пояснения см. в тексте). Аппроксимация положения, связанного со вспышкой КВМ (SOHO LASCO C2, черные квадраты) на момент его старта показана черной прямой. Шкалы: слева по оси Y – поток электронов в канале в логарифмах, по центру – высота фронта КВМ от центра диска в солнечных радиусах, справа – темп счета ACS SPI в логарифмах; внизу по оси X – время в UT минутах, с началом “0” в максимуме SXR-излучения (GOES, 07:10 UT).

длительной инжекции в МП. Электронное событие, зарегистрированное EPHIN, показано на рис. 4б (см. черные кривые) в таком же временном масштабе.

3.2. Вспышка C1.2 29.09.2013 г. и связанное с ней протонное событие

На рисунке 5 показан временной профиль SXR-излучения во вспышке C1.2, произошедшей 29 сентября 2013 г., а также аппроксимация положения КВМ в различные моменты времени по данным SOHO LASCO. За “0” было взято время всплеска на 245 МГц в 22:07 UT (RSTN). Такой выбор “0” приводит к почти синхронному возрастанию в канале GOES 0.5–4 Å в рассматриваемых вспышках (рис. 2 и рис. 5). Собственно, SXR-вспышка началась в 21:43 UT (–24 мин), ее формальный максимум в 23:39 UT и конец в 01:03 UT уже 30 сентября находятся вне временного масштаба рисунка. Возрастание SXR-потока в высокоэнергичном канале GOES (0.5–4 Å), начавшееся до (–20 мин) и длившееся примерно

15 мин, выделяется в отдельную вспышку B6.1 с максимумом примерно на (–15) мин (21:52 UT), (SXR-поток опустился до фоновых значений около “0” +/- 4 мин). Этот 15-минутный промежуток можно считать выраженной импульсной фазой вспышки в канале 0.5–4 Å (GOES), так как детектор ACS SPI (светло-серая кривая) показал два значимых HXR-пика около (–15 мин).

Последующее возрастание SXR-потока связано с подъемом КВМ, который начался как раз между (–4) мин и (+4) мин, согласно аппроксимации его положения (см. рис. 5). Это возрастание является постэруптивной фазой вспышки C1.2 29 сентября 2013 г. и аналогом вспышки C1.2 26 сентября 2011 г. Необходимо отметить, что почти одновременно с рассматриваемой вспышкой 29 сентября произошла другая вспышка балла B9.8 (начало в 21:42 UT, максимум в 22:48 UT, конец в 23:45 UT) с координатами N09W56 в AON00A 11850, но которая не дала заметного вклада в наблюдаемые процессы в МП.

Исследуемое солнечное событие, произошедшее вечером 29 сентября 2013 г., было локализо-

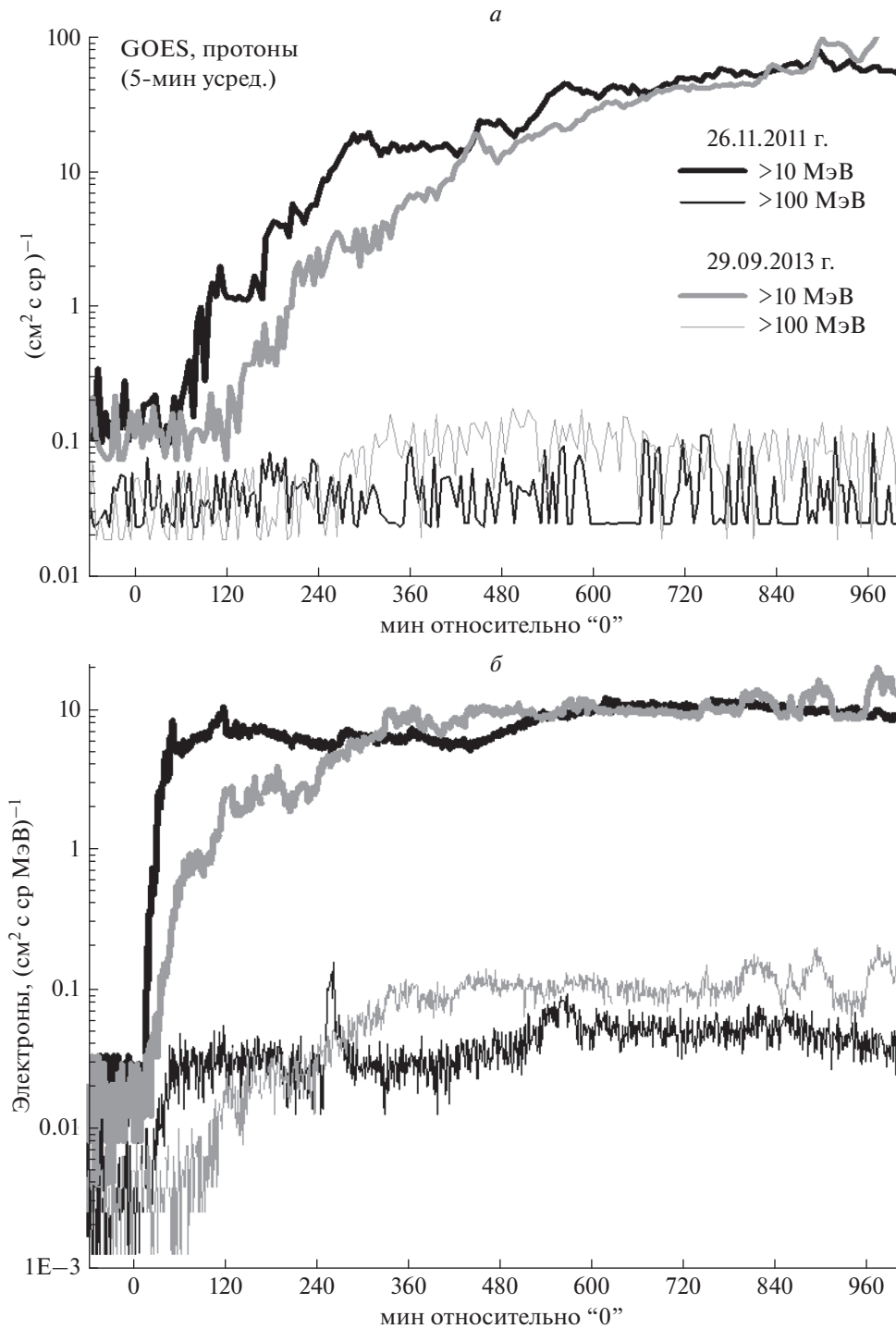


Рис. 4. (а) Временные профили протонов в каналах GOES: толстые кривые >10 МэВ, тонкие кривые – >100 МэВ в событиях 26.11.2011 г. – черные кривые и 29.09.2013 г. – серые кривые. Шкалы: слева по оси Y – интегральный поток протонов; внизу по оси X – время в UT минутах с началом “0” относительно выбранных моментов (см. в тексте). (б) Временные профили в каналах EPHIN: толстые кривые 0.67–3 МэВ, тонкие кривые – 2.64–10.4 МэВ в событиях 26.11.2011 г. – черные кривые и 29.09.2013 г. – серые кривые. Шкалы: слева по оси Y – дифференциальный поток электронов; внизу по оси X – время в UT минутах с началом “0” относительно выбранных моментов (см. в тексте).

вано вне АО, его координаты в линии 131 Å (SDO AIA) были N10W33, которые благоприятны для прихода солнечных космических лучей к Зем-

ле. На рисунке б показаны временные профили потоков релятивистских электронов SOHO EPHIN (пустые квадраты, кружки и треугольники) и темп

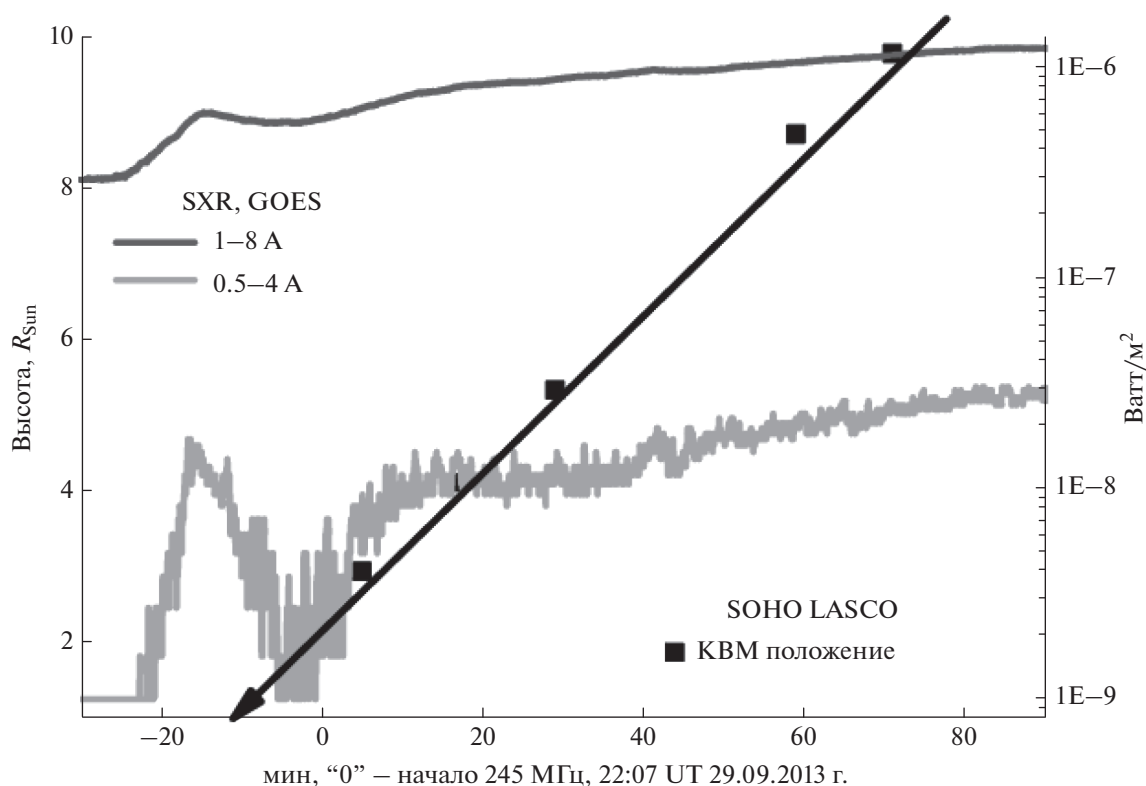


Рис. 5. Сравнение временного профиля вспышечного SXR-излучения в каналах 0.5–4 Å (светло-серая кривая) и 1–8 Å (серая кривая) по данным GOES в событии 29.09.2013 г. с аппроксимацией на момент его старта (черная прямая) положения, связанного со вспышкой КВМ (черные квадраты) по данным SOHO LASCO C2. Шкалы: справа по оси Y – SXR-поток в логарифмах, слева – высота фронта КВМ от центра диска в солнечных радиусах; внизу по оси X – время в UT минутах с началом “0” в момент регистрации радиоизлучения на 245 МГц (RSTN, 22:07 UT).

счета детектора ACS SPI (светло-серая кривая). Возрастание потока электронов над фоном в канале 0.27–0.7 МэВ детектора EPHIN началось примерно на (+10) мин, в канале 0.67–3.0 МэВ после (+20) мин. Эти электроны выходили в МП на (+6) и (+17) мин в постэруптивной фазе вспышки C1.2, а не в импульсной фазе, развивавшейся до (–4) мин. Слабое возрастание в канале 2.64–10.4 МэВ зарегистрировано после (+110) мин и видно на рис. 4б, но находится вне временного масштаба рис. 6.

Возрастание темпа счета детектора ACS SPI (светло-серая кривая) около (+40) мин на рис. 6, мы интерпретируем как начало протонного возрастания. Если первыми пришли протоны 100 МэВ/500 МэВ, то они должны были выйти в МП на (+25)/(+35) мин. Возможно, время первой регистрации протонов задержано из-за малой интенсивности их потока. Временной профиль ACS SPI (светло-серая кривая) подобен профилям потока электронов SOHO EPHIN (пустые квадраты и кружки), если увеличить показания ACS SPI примерно в 10 раз. Как и в предыдущем случае, такое подобие свидетельствует о длительном

ускорении протонов на постэруптивной фазе вместе с электронами [Струминский и др., 2020].

Протонное событие 29 сентября, зарегистрированное GOES > 10 МэВ (см. рис. 4а, серые кривые) началось примерно через 110 мин после “0” и достигло максимума спустя 15 ч. Протоны 10 МэВ должны были выйти в МП не ранее (+52) мин, т.е. они, по-видимому, должны были удерживаться за фронтом КВМ. Электронное событие EPHIN в таком же временном масштабе показано на рис. 4б (см. серые кривые). Сравнивая возрастания солнечных электронов и протонов в событиях 26 ноября 2011 г. и 29 сентября 2013 г. на рис. 4а, 4б необходимо отметить, что частицы во 2-м событии инжектировались в МП с меньшей интенсивностью, но потоки в обоих событиях оказались сравнимыми примерно через 15 ч после “0”. Кроме того, в этот момент оказалось сравнимым соотношение между протонами и электронами.

4. ДИСКУССИЯ И ВЫВОДЫ

Вспышки C1.2, произошедшие 26 ноября 2011 г. и 29 сентября 2013 г., обладали практически всеми признаками протонных событий [Черток,

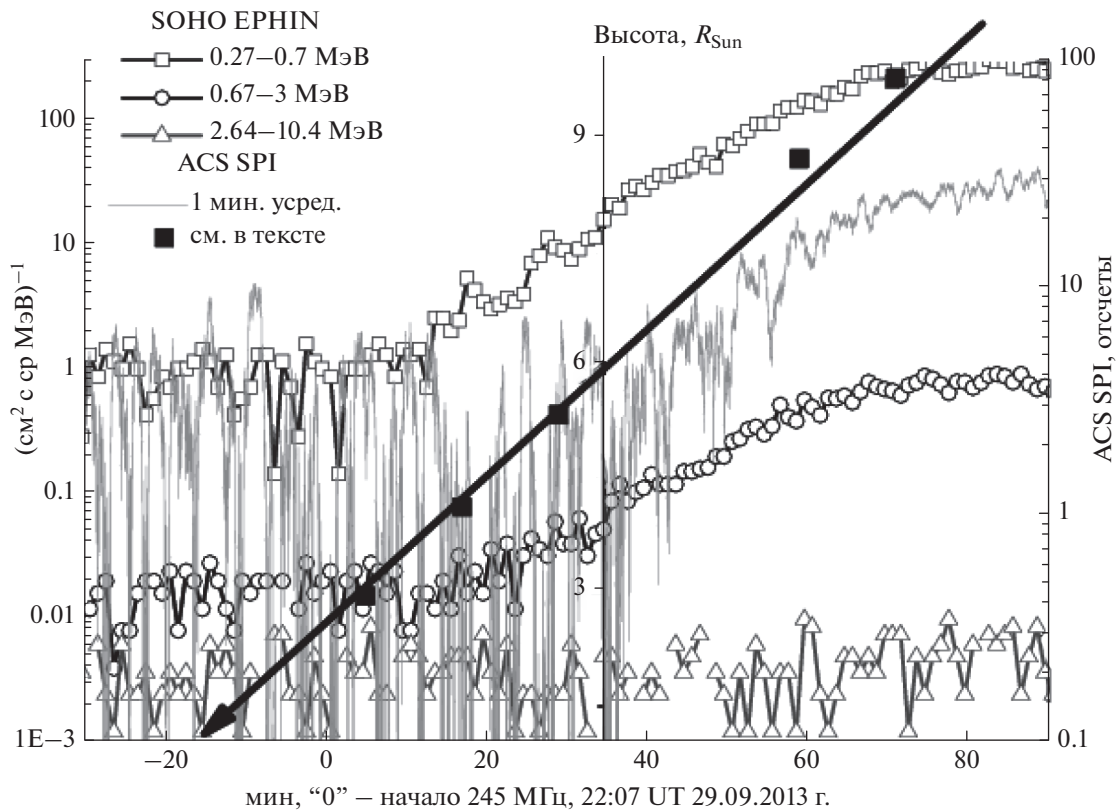


Рис. 6. Сравнение временных профилей потоков солнечных электронов в трех каналах SOHO EPHIN (пустые квадраты, кружки и треугольники, соответственно) в событии 29.09.2013 г. с темпом счета ACS SPI (светло-серая кривая – сглаженные средние за 1 мин данные, пояснения см. в тексте). Аппроксимация положения, связанного со вспышкой КВМ (SOHO LASCO C2, черные квадраты) на момент его старта, показана черной прямой. Шкалы: слева по оси Y – поток электронов в канале в логарифмах, по центру – высота фронта КВМ от центра диска в солнечных радиусах, справа – темп счета ACS SPI в логарифмах; внизу по оси X – время в UT мин, с началом “0” в момент регистрации радиоизлучения на 245 МГц (RSTN, 22:07 UT).

2018] за исключением значимых проявлений в рентгеновском и MW-диапазонах. Авторы работ [Gopalswamy et al., 2015; Cliver et al., 2019] рассматривают эти события, как яркие примеры ускорения солнечных протонов на ударных волнах КВМ и незначительной роли вспышек в этом процессе. Однако отсутствие видимых проявлений в рентгеновском и MW-излучении можно объяснить взаимодействием ускоренных электронов в областях с низкой плотностью вещества и слабым магнитным полем. Кроме того, количество взаимодействующих электронов может быть относительно малым вследствие их большего выхода в МП.

Нами были рассмотрены результаты наблюдений солнечных электронов (~1 MeV; SOHO EPHIN) и протонов (>100 МэВ; GOES, ACS SPI) в МП после этих двух вспышек. Времена первой регистрации солнечных электронов (EPHIN, 0.27–0.7, 0.67–3.0 МэВ) и протонов (>100 МэВ, GOES и >500 МэВ, ACS SPI) показывают, что частицы

меньших энергий инжектировались в МП раньше, чем больших.

Временные профили потоков этих протонов и электронов были подобны на фазе роста и свидетельствовали в пользу их общего механизма ускорения и распространения. Постепенный рост интенсивностей потоков, по нашему мнению, показывает длительную и постепенную инжекцию частиц в МП, которая может являться результатом продолжительного ускорения или захвата. Так как продолжительный захват электронов маловероятен то, скорее всего, имело место длительное ускорение.

Длительное ускорение протонов реализуется на постэруптивной фазе солнечных вспышек или на ударной волне КВМ. Согласно существующим теоретическим представлениям [Miller et al., 1997] ускорение солнечных электронов до ~10 МэВ ударной волной находится под вопросом. Таким образом, релятивистские электроны и протоны одновременно ускорялись на постэруптивной

фазе солнечных вспышек. Отметим, что автор работы [Kahler, 2007], уверенный в ускорении протонов на ударных волнах, использует подобие временных профилей электронов и протонов, наблюдающихся в МП, для обоснования возможности ускорения релятивистских электронов ударными волнами.

Механизмом ускорения на постэруптивной фазе солнечных вспышек могут быть различные варианты стохастического ускорения. Например, ускорение МГД-турбулентностью (см., например, [Miller et al., 1997; Petrosian, 2012; Vlahos, 2019] и ссылки там) позволяет ускорять электроны ~ 10 МэВ и протоны > 100 МэВ.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят анонимного рецензента за полезные замечания, Ю.И. Логачева (НИИЯФ МГУ) и А.М. Садовского (ИКИ РАН) за плодотворные и стимулирующие дискуссии. Мы благодарим участников наземных и космических экспериментов, данные которых находятся в открытом доступе и были использованы в работе (ACS SPI, GOES, RSTN, RHESSI, SOHO EPHIN и SOHO LASCO).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа Григорьевой И.Ю. выполнена по программе “Энерговыделение”, Струминского А.Б. осуществлялась за счет субсидии программы “Плазма”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы сообщают, что у них отсутствует конфликт интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Григорьева И.Ю., Струминский А.Б., Шаховская А.Н. Протонные вспышки с невыраженной импульсной фазой / Тр. XXIII Всероссийской конф. “Солнечная и солнечно-земная физика – 2019”. Санкт-Петербург, 7–11 октября 2019 г. Т. 1. Ред. А.В. Степанов, Ю.А. Наговицын. Санкт-Петербург: изд-во ГАО РАН. С. 123–126. 2019.
- Струминский А.Б. Свидетельства длительного существования солнечных протонов с энергией > 100 МэВ в корональных структурах // Астрон. журн. Т. 80. № 11. С. 992–100. 2003.
- Струминский А.Б., Логачев Ю.И., Григорьева И.Ю., Садовский А.М. Два типа длительных вспышек: солнечные протоны и релятивистские электроны / Тр. XXIII Всероссийской конф. “Солнечная и солнечно-земная физика – 2019”. Санкт-Петербург, 7–11 октября 2019 г. Т. 1. Ред. А.В. Степанов, Ю.А. Наговицын. Санкт-Петербург: изд-во ГАО РАН. С. 377–380. 2019.
- Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И., Садовский А.М. Солнечные электроны и протоны в событиях 4–10 сентября 2017 г. и сопутствующие явления // Физика плазмы. Т. 46. № 2. С. 139–153. 2020.
- Чертюк И.М. Диагностический анализ солнечных протонных вспышек сентября 2017 г. по их радио-всплескам // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 58. № 4. С. 471–478. 2018.
- Belov A., Kurt V., Mavromichalaki H., Gerontidou M. Peak-size distributions of proton fluxes and associated soft X-ray flares // Solar Phys. V. 246. P. 457–470. 2007.
- Cliver E.W. Flare vs. Shock acceleration of high-energy protons in solar energetic particle events // Astrophys J. V. 832. № 2. P. 128–136. 2016.
- Cliver E.W., Kahler S.W., Kazachenko M., Shimojo M. The disappearing solar filament of 2013 September 29 and its large associated proton event: implications for particle acceleration at the Sun // Astrophys J. V. 877. № 1. P. 11–28. 2019.
- Daibog E.I., Melnikov V.F., Stolpovskii V.G. Solar energetic particle events from solar flares with weak impulsive phases of microwave emission // Solar Phys. V. 144. P. 361–372. 1993 (и ссылки там же).
- Gopalswamy N., Mäkelä P., Akiyama S., Yashiro S., Xie H., Thakur N., Kahler S.W. Large solar energetic particle events associated with filament eruption outside active regions // Astrophys J. V. 806. № 1. P. 8–22. 2015.
- Grechnev V.V., Kiselev V.I., Uralov A.M., Meshalkina N.S., Kochanov A.A. An updated view of solar eruptive flares and the development of shocks and CMEs: history of the 2006 December 13 GLE-productive extreme event // Publ. Astron. Soc. Japan. V. 65. № SP1. P. S9–S26. 2013.
- Grechnev V.V., Kiselev V.I., Meshalkina N.S., Chertok I.M. Relations between microwave bursts and near-Earth high-energy proton enhancements and their origin // Solar Phys. V. 290. P. 2827–2855. 2015.
- Guidice D.A., Cliver E.W., Barron W.R., Kahler S. The Air Force RSTN System // Bull. American. Astron. Soc. V. 13. P. 553. 1981.
- Kahler S.W. The role of the big flare syndrome in correlations of solar energetic proton fluxes and associated microwave burst parameters // J. Geophys. Res. V. 87. P. 3439–3448. 1982.
- Kahler S.W. Evidence for solar shock production of heliospheric near-relativistic and relativistic electron events // Space Sci. Rev. V. 129. № 4. P. 359–390. 2007.
- Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J. et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // Solar Phys. V. 275. № 1–2. P. 17–40. 2012.
- Lin R.P., Dennis B.R., Hurford G.J. et al. The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) // Solar Phys. V. 210. № 1–2. P. 3–32. 2002.
- Miller J.A., Cargill P.J., Emslie A.G., Holman G.D., Dennis B.R., LaRosa T.N., Winglee R.M., Benka S.G., Tsuneta S. Critical issues for understanding particle acceleration in impulsive solar flares // J. Geophys. Res. V. 102. № A7. P. 14631–14660. 1997.
- Müller-Mellin R., Kunow H., Fleißner V. et al. COSTEP – Comprehensive Suprathermal and Energetic Particle analyser // Solar Phys. V. 162. № 1–2. P. 483–504. 1995.

- *Petrosyan V.* Stochastic acceleration by turbulence // *Space Sci. Rev.* V. 73. № 1–4. P. 535–556. 2012.
- *Share G.H., Murphy R.J., White S.M., Tolbert A.K., Dennis B.R., Schwartz R.A., Smart D.F., Shea M.A.* Characteristics of late-phase >100 MeV gamma-ray emission in solar eruptive events // *Astrophys J.* V. 869. № 2. P. 182–236. 2018.
- *Schanne S.* Pre-launch calibration campaign of the gamma-ray spectrometer aboard the INTEGRAL satellite // *New Astron. Rev.* V. 46. № 8–10. P. 605–609. 2002.
- *Schanne S., Cordier B., Gros M. et al.* The space-borne INTEGRAL-SPI gamma ray telescope: test and calibration campaigns // *IEEE T. Nucl. Sci.* V. 49. № 3. P. 1226–1232. 2002.
- *Struminsky A.* Prolonged release of 100 MeV solar protons in the GLE events of 1997–2002 // *Proc. 28-th Intern Cosmic Ray Conference.* Tsukuba, Japan, July 31–August 7 2003. P. 3317–3320. 2003.
- *Struminsky A.* Large SEP events of 2012: proton onset and source function // *J. Phys. Conf. Ser.* V. 409. № 1. P. 2148–1252. 2013
- *Vlahos L., Isliker H.* Particle acceleration and heating in a turbulent solar corona // *Plasma Phys. Contr. F.* V. 61. № 1. P. 4020–4032. 2019.