

УДК 523.985

КРИТЕРИИ ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ ПО СОЛНЕЧНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

© 2024 г. А. Б. Струминский¹, *, А. М. Садовский¹, И. Ю. Григорьева²

¹ Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия

² Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН (ГАО РАН), Санкт-Петербург, Россия

* e-mail: astruminsky@gmail.com

Поступила в редакцию 15.08.2023 г.

После доработки 24.09.2023 г.

Принята к публикации 23.11.2023 г.

Обсуждается последовательность преодоления пороговых значений ряда физических характеристик для предсказания протонных событий в реальном времени. Каждая характеристика добавляет новый физический смысл, который уточняет предсказание. Для учета всех характеристик необходимы следующие непрерывные патрульные наблюдения: 1) магнитного поля активной области (всплытие потока) и общего магнитного поля Солнца, которые могут предсказать начало вспышечной активности за несколько дней до основных событий; 2) мягкого рентгеновского излучения в двух каналах для вычисления температуры (T) и меры эмиссии плазмы, которые могут показать преднагрев до $T > 10$ МК, необходимый для начала ускорения протонов (первые минуты до начала жесткого рентгеновского излучения с энергиями > 100 кэВ); 3) жесткого рентгеновского излучения > 100 кэВ или микроволнового излучения (> 3 ГГц), которые показывают интенсивность и длительность работы ускорителя электронов (единицы и десятки минут до прихода протонов с энергиями > 100 МэВ); 4) радиоизлучения на плазменных частотах (< 1000 МГц), показывающего развитие вспышечного процесса вверх в корону и ведущего к корональному выбросу массы за несколько минут до начала радиовсплесков II и IV типов (первые десятки минут до появления коронального выброса массы в поле зрения коронографа); 5) направление и скорость распространения корональных выбросов массы, которые определяют условия выхода ускоренных протонов в гелиосферу. Эти этапы солнечных протонных вспышек иллюстрируются наблюдениями протонных событий 2–9 августа 2011 г. Для количественного предсказания времени начала, максимума и величины протонного потока, а также его флюенса необходимо создание статистических регрессионных моделей, основанных на всех перечисленных характеристиках прошедших солнечных протонных событий.

DOI: 10.31857/S0016794024020019, EDN: DZOMYU

1. ВВЕДЕНИЕ

При осуществлении и планировании космической деятельности необходимо знать ожидаемые радиационные условия. В частности, желательно уметь предсказывать солнечные протонные события (СПС) — время начала, эволюцию временных профилей, время максимума и длительность спада потока протонов различных энергий, а также их полные флюенсы. Отметим, что реальную радиационную опасность представляют СПС, чья максимальная интенсивность превышает глубину модуляции галактических космических лучей (ГКЛ) в цикле солнечной активности, так как космические аппараты должны быть адаптированы к полям в пределах возможных вариаций ГКЛ. Однако уровень современных методов предсказания СПС

не позволяет использовать их в реальном времени. По-прежнему существуют пробелы в понимании физики СПС, используются преимущественно эмпирические модели предсказания, основанные на статистическом анализе солнечных и межпланетных явлений, связанных с СПС (см. [Кузнецов, 2007; Нымник, 2007; Balch, 2008; García-Rigo et al., 2016]).

Патрульные наблюдения на спутниках GOES мягких рентгеновских лучей (SXR) дают самый длинный и непрерывный ряд данных о вспышечной активности, которые поступают практически в реальном времени. Именно поэтому они широко используются для предсказания СПС в реальном времени и верификации различных статистических моделей предсказания СПС [Garcia, 2004; Belov et

al., 2007; Белов, 2017; Alberti et al., 2017; Kahler et al., 2017; Núñez, 2011, 2015, 2018; Núñez and Paul-Pena, 2020; Ling and Kahler, 2020]. Достаточно полный обзор современного состояния прогностических моделей на 2017 г. можно найти в статье [Swalwell et al., 2017].

Ускорение протонов с $E > 100$ МэВ и релятивистских электронов в “протонных” солнечных вспышках происходит достаточно редко. Для определения механизма ускорения, а, следовательно, обоснованного предсказания СПС, необходимо связать наблюдательные характеристики электромагнитного излучения (от радио- до гамма-излучения) с физическими условиями в солнечных вспышках. В работе [Hudson, 1978] было высказано предположение, что характеристики “протонных” вспышек сложнее зависят от свойств физических процессов, чем простая пропорциональность полной энергии, т. е. демонстрируют пороговые эффекты. В этом случае эффекты становятся виднее “more striking” для больших вспышек, но сами вспышечные процессы по сути не меняются.

Сравнение потоков ускоренных электронов и протонов как по непосредственным наблюдениям в межпланетном пространстве (МП) [Ramaty et al., 1978], так и результатам их взаимодействия в атмосфере Солнца (излучение жестких рентгеновских лучей и γ -линий) [Shih et al., 2009], показывает, возможно, два механизма ускорения, которые происходят в двух фазах. В первой фазе ускоряются преимущественно электроны < 100 кэВ, а во второй фазе ускоряются как электроны > 100 кэВ, так и протоны. По всей видимости, механизм ускорения один, а фазы различаются возможностью наблюдения протонов в атмосфере Солнца. Во второй фазе протоны уже преодолели энергетический порог генерации γ -линий и рождения нейтронов при взаимодействии с ядрами [Струминский и др., 2020]. Если ориентироваться на ускорение протонов > 100 МэВ и электронов > 1 МэВ, которые наблюдаются в МП со сходными временными профилями, то этим единым механизмом является длительное стохастическое ускорение [Miller et al., 1997]. При этом нужно принять во внимание, что без учета процессов излучения протоны и электроны ускоряются до одинаковых энергий за равное время, но время их ускорения до одинаковых скоростей различается в m_p/m_e раз.

Для объяснения пропорционального количества высокоэнергичных электронов и протонов Герштейн [1979] предложил механизм их коллективного ускорения (смоуктрон). Прошедшие годы показали, что “смоуктрон” вряд ли реализуем даже в лабораторных условиях, хотя идеи ускорения ионов посредством электронных колец широко использовались и используются [Саранцев и Перельштейн, 1979], но некоторые идеи,

легшие в его основу, заслуживают упоминания. По всей видимости, Герштейн [1979] был первым, кто отметил два принципиальных момента, необходимые для начала ускорения протонов (второй фазы ускорения) — нагрев плазмы до температур более 10 МК и сохранения электронейтральности плазмы в процессе ускорения.

Начиная с пионерских работ [Garcia, 1994a, b] стали рассматривать не только мощность SXR-излучения, но и температуру (T) и меру эмиссии (EM) SXR-плазмы. Например, Garcia [2004] предлагает использовать температуру вспышечной плазмы в максимуме SXR-интенсивности, так как в диапазоне от M1 до X2 вспышки, связанные с СПС (> 10 МэВ, > 10 PFU), существенно холоднее, чем вспышки без СПС [Garcia, 1994a, b]. Однако максимальная температура вспышечной плазмы показывает наименьший коэффициент корреляции с максимальной амплитудой СПС среди всех рассмотренных параметров [Garcia, 2004]. Вероятно, малая SXR-температура вспышек с СПС связана с дополнительным отводом энергии при ускорении быстрых ($V_{cme} > 1000$ км/с) и широких KBM [Ling and Kahler, 2020; Kahler and Ling, 2022].

Непосредственную информацию об ускорении электронов дают нам нетепловые HXR- и микроволновое излучение. Эффект Neupert [1968] косвенным образом через нагрев плазмы ускоренными электронами и последующее “хромосферное” испарение связывает между собой тепловое (SXR) и нетепловое (HXR и микроволновое) излучения. При этом на момент наблюдения HXR- и микроволнового излучения об ускорении протонов ничего не известно, так как они могли еще не достичь энергии порога регистрации γ -линий (начало второй фазы ускорения). Также γ -линий (первая фаза ускорения) может быть связано с отсутствием нужного инструмента в нужное время и в нужном месте (патрульных наблюдений). Поэтому в первом приближении об ускорении протонов во вспышке можно судить по нетепловому излучению электронов, предполагая с некоторой пороговой энергии электронов пропорциональное ускорение протонов.

О статистической связи СПС со вспышечным HXR-излучением говорит эффект Kiplinger, который показал, что временная эволюция HXR-спектра $E > 30$ кэВ “soft — hard — harder” (SHH) характерна для вспышек с СПС. Такую эволюцию спектра SHH (спектр становится жестче со временем) было предложено использовать для автоматического предсказания СПС [Kiplinger, 1995]. Критический анализ этого предложения был проведен в работе [Kahler, 2012]. По мнению этого автора, вспышки с SHH эволюцией HXR-спектра и KBM являются составляющими больших эруптивных вспышек, чем и объясняется хорошая связь SHH

HXR-вспышек с СПС. Эволюция SHN HXR спектра $E > 30$ кэВ является следствием длительного стохастического ускорения.

Предсказание СПС с использованием данных по микроволновому и SXR-излучению имеет такую же вероятность, как и с использованием только данных по SXR-излучению, но без ложных тревог за рассматриваемый период и с несколько увеличенным временем предупреждения [Zussa et al., 2017]. Микроволновые патрульные наблюдения улучшают схему предсказания СПС по сравнению со схемой, использующей только SXR-данные, поэтому наличие качественных микроволновых наблюдений, доступных в реальном времени, представляется чрезвычайно желательным для улучшения предсказания СПС [Zussa et al., 2017]. Информация о дециметровых радиовсплесках II, III и IV типов и SXR-вспышках $\geq M2$ использовалась для предсказания СПС $E > 10$ МэВ [Núñez and Paul-Pena, 2020], для выбранного интервала получились следующие оценки: вероятность детектирования 70.2%, объявление ложной тревоги 40.2%, время ожидания 9 ч 52 мин.

Методика предсказания СПС-событий по радионаблюдениям развивается в ИЗМИРАНе достаточно давно (см. [Черток, 2018] и ссылки там). Статистически было установлено, что вспышка может быть источником СПС у Земли с потоком протонов с $E > 10$ МэВ $J_{10} \geq 5\text{--}10$ PFU (*Proton Flux Unit*, $1 \text{ PFU} = 1 \text{ (см}^2 \text{ с пр)}^{-1}$), если максимальная интенсивность связанных с ней микроволновых радиовсплесков хотя бы на одной из частот в диапазоне 2.7—15.4 ГГц превышает 500 SFU (*Solar Flux Unit*, $1 \text{ SFU} = 10^{-22} \text{ Вт м}^{-2} \text{ Гц}^{-1}$), причем продолжительность радиовсплеска должна быть большой, а также сопровождаться метровым компонентом радиоизлучения — всплесками II и IV типов. Странно, что в методике ИЗМИРАН не упомянуто плазменное радиоизлучение на частотах < 1415 МГц (дециметровые радиоволны), которое должно предшествовать всплескам II и IV типов на частотах < 180 МГц.

Напомним, что согласно существующим представлениям [Aschwanden, 2006], место первичного энерговыделения — область генерации частот ~ 500 МГц. Klein et al. [2010] заключили, что радиоизлучение на дециметровых и более длинных волнах дает достоверный индикатор проникновения частиц, ускоренных во вспышке, в верхнюю корону и межпланетное пространство (МП). Отсутствие такого излучения во вспышке может быть использовано как свидетельство того, что вспышка не будет сопровождаться СПС даже при достаточно мощном SXR-излучении. Однако в работе [Zussa et al., 2017], как и в работе [Черток, 2018] дециметровое излучение для улучшения прогнозирования

СПС не рассматривалось, ограничившись только микроволнами.

Наибольшую опасность представляют вспышечные события с регистрацией солнечных космических лучей (СКЛ), в которых ускоряются протоны до энергии более 100 МэВ. Ускорение протонов с $E > 100$ МэВ и релятивистских электронов с $E > 1$ МэВ, по всей видимости, происходит в длительных эруптивных вспышках на фоне ускорения корональных выбросов массы со скоростями, превышающими локальную вторую космическую скорость (618 км/с на поверхности Солнца), в процессе множественного пересоединения — “магнитной детонации” [Григорьева и др., 2023; Струминский и др., 2023]. Такой подход открывает возможность прогноза СПС с энергией протонов > 100 МэВ в реальном времени, используя несколько физических порогов, связанных с энергетикой вспышечного процесса.

2. ПОРОГОВЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Солнечное магнитное поле является единственным доступным источником энергии в короне для осуществления всего комплекса явлений, который ассоциируется с солнечной вспышкой. Наблюдения показывают, что вспышки в активной области (АО) происходят при взаимодействии ранее существовавшего магнитного потока с одним или несколькими новыми магнитными потоками, одновременно или последовательно всплывающими в атмосфере Солнца. Темп энерговыделения зависит от скорости всплывания нового магнитного потока (магнитной энергии).

Рост вспышечной активности в АО наступает при появлении нового быстрого магнитного потока; значимые солнечные вспышечные события (СВС) происходят через 0.5—2 сут после обнаружения достаточно большого магнитного потока ($> 10^{13}$ Вб) при скорости его всплывания $> 10^9$ Вб/с (см. [Ишков, 2023] и ссылки там). Это позволяет прогнозировать период вспышечного энерговыделения на масштабе нескольких дней до реализации первого значимого СВС. Вспышки больших и средних баллов (по классификации SXR-излучения, GOES) всегда группируются в серии — период вспышечного энерговыделения длительностью 16—80 ч, который заканчивается при прекращении поставки магнитной энергии (всплывания нового магнитного потока) и образованием новой устойчивой конфигурации магнитного поля АО. Иногда серии вспышек могут происходить не в одной, а в нескольких АО, связанных друг с другом общим магнитным полем, т. е. в комплексах активности.

Описанные выше АО (или комплексы активности) способны создать условия для длительного стохастического ускорения электронов и протонов, которое не должно нарушать электронейтральность плазмы. Для этого необходимо, чтобы количество электронов и протонов, ускоренных до одинаковых скоростей, было сопоставимо [Струминский и др., 2020]. В этом случае “протонная вспышка” (появление взаимодействующих протонов с $E > 10$ МэВ) должна начинаться при электронной температуре плазмы ~ 12 МК (протоны с $E \sim 2$ МэВ эквивалентны по скоростям электронам с $E \sim 1.0$ кэВ). Горячая плазма (с $T > 12$ МК) необходима для обеспечения электронейтральности, которая должна сохраняться все время ускорения протонов (наблюдения НХР-и/или микроволнового излучения)!

Hudson et al. [2021] обратили внимание на наблюдательный факт, что импульсной фазе вспышек с НХР-излучением предшествует горячее SXR-начало (a hot X-ray ‘onset’) с температурой плазмы 10—15 МК. Для его обоснования Цап и Мельников [2023] сделали оценки, которые показали, что эффективное доускорение электронов возможно лишь в случае сравнительно разреженной ($n < 10^{10} \text{ см}^{-3}$) и горячей ($T > 10^7 \text{ К}$) фоновой плазмы. Начало генерации π^0 -мезонов будет возможно при энергии электронов ~ 150 кэВ (протоны с $E \sim 300$ МэВ эквивалентны по скоростям электронам с $E \sim 150$ кэВ), т. е. на фоне микроволнового (ГГц) или НХР-излучения $E > 100$ кэВ. Для достижения таких скоростей протонам требуется время в m_p/m_e , как минимум, раз большее, чем электронам. Поэтому, ключевым моментом является время ускорения электронов до энергий ~ 100 кэВ, которое определяет необходимую длительность наблюдения НХР-излучения с $E > 100$ кэВ и/или микроволнового излучения, а также ожидаемый момент прихода первых ускоренных протонов на Землю при свободном распространении.

Существуют наблюдательные данные, которые показывают время ускорения электронов до кинетической энергии ~ 100 кэВ порядка ~ 400 мс [Miller et al., 1997]. Также наблюдаются задержки между НХР-всплесками на различных энергиях электронов (20, 50, 100, 200 и 300 кэВ) порядка десятков миллисекунд, которые могут быть обусловлены временем ускорения (см. обзор [Лысенко и др., 2020] и ссылки там). Поэтому время, необходимое для набора $E \sim 200$ МэВ протонами, будет ~ 1 мин при ускорении электронов до кинетической энергии ~ 100 кэВ за 40 мс (“быстрое” ускорение) или ~ 10 мин при ускорении электронов до ~ 100 кэВ за 400 мс (“медленное” ускорение). Если до нуля времени в солнечных событиях принять начало микроволнового излучения на частотах 8.8—15.4 ГГц (оно обычно совпадает с появлением значимого сигнала НХР-излучения

с $E \sim 100$ кэВ), то ожидаемое время прихода протонов с $E \sim 200$ МэВ ($V/c = 0.57$) на орбиту Земли будет ~ 11 мин (~ 21 мин соответственно) при распространении без рассеяния по спирали Паркера до Земли (1.3 а. е., скорость солнечного ветра 300 км/с). Таким образом, неопределенность характерного времени ускорения солнечных электронов до $E \sim 100$ кэВ определяет неопределенность времени первого прихода СП с $E \sim 200$ МэВ на орбиту Земли и составляет порядка 10 мин. Необходимое время (характерный размер) для ускорения протонов с $E > 100$ МэВ задает, по всей видимости, развитие вспышечного процесса вверх, связанное с ускорением КВМ.

Исследование вспышек без солнечных протонных событий (СПС) и КВМ, показывает [Klein et al., 2010; Grigor’eva and Struminsky, 2021; Струминский и др., 2021, 2023], что они выделяются отсутствием плазменного излучения на частотах менее 1415 МГц. Последовательное появление этого излучения на уменьшающихся частотах и/или одновременное его наличие в широком диапазоне частот, свидетельствует о развитии вспышки вверх и является, по нашему мнению, характеристикой ускоряющегося КВМ — развития “протонной вспышки” вверх.

Наблюдение плазменных частот дает возможность для оценки линейного размера источника SXR по мере эмиссии (ЕМ). Так как $EM \sim n^2 L^3$, то $L \sim \sqrt[3]{EM / n^2}$. Предполагая, что плазменная частота $\nu_p = 9000 \sqrt{n}$, то $EM \sim \nu_p^4 L^3$. Действительно, ускорение КВМ происходит на фоне НХР-излучения при росте меры эмиссии. Интенсивное “хромосферное испарение” должно компенсировать расширение источника и уменьшение концентрации плазмы. В этом случае получаем $EM_{500} > EM_{1415}$ или $L_{500} > L_{1415} (1515 / 500)^{4/3}$, при $L_{1415} \approx 15$ Мм имеем $L_{500} \approx 60$ Мм, а $L_{245} > L_{500} (500 / 245)^{4/3}$ и $L_{245} \approx 155$ Мм (индексами обозначены соответствующие частоты в МГц). Таким образом, наблюдение плазменного радиоизлучения с частотами < 500 МГц, является свидетельством преодоления вспышкой порога по высоте 60 Мм над фотосферой, а 245 МГц — 155 Мм.

Помимо этого, обратим внимание на то, что гелиоцентрический радиус $R = GmM/kT$, найденный из равенства тепловой энергии водородной плазмы и ее потенциальной энергии в гравитационном поле Солнца, при $T > 10$ МК сопоставим с полем зрения коронографа LASCO C2 ((1.5—6) $R_\odot$). Подставляя константы, получаем $T = 22 / R$ [МК], где R измеряется в радиусах Солнца. Для гелиоцентрического расстояния $1.5 R_\odot$ температура составит 14.7 МК.

При регистрации первого прихода СП детекторами, интегральными по энергии, существует

неопределенность времени первого прихода СП, связанная с дисперсией по скоростям. Оценим максимальное время ускорения протонов от $E \sim 100$ МэВ до ~ 500 МэВ, которое позволит протонам с $E \sim 500$ МэВ ($V/c = 0.75$) прийти раньше протонов с $E \sim 100$ МэВ ($V/c = 0.43$). При распространении без рассеяния по спирали Паркера до Земли (1.3 а. е., скорость солнечного ветра 300 км/с) время распространения протонов с $E \sim 500$ МэВ ($V/c = 0.75$) составит ~ 15 мин, а для протонов с $E \sim 100$ МэВ ($V/c = 0.43$) будет ~ 25 мин. Таким образом, максимальное время ускорения протонов с E от ~ 100 МэВ до ~ 500 МэВ должно быть менее ~ 10 мин (темп ускорения 0.67 МэВ/с), чтобы первыми пришли протоны с энергией > 500 МэВ.

Эти оценки обуславливают выбор нулевого времени для анализа явлений, связанных с солнечными протонными вспышками, а также критерии “раннего” ($< +20$ мин) и “позднего” ($> +20$ мин) прихода СП на орбиту Земли, относительно нулевого времени [Григорьева и др., 2023]. В случае “быстрого” режима ускорения электронов и протонов первые СП с $E > 100$ МэВ будут наблюдаться на Земле через 10 мин после выбранного нами нуля (возможно, одновременно или позднее протонов с $E > 500$ МэВ). В случае же “медленного” режима ускорения электронов и протонов первые СП с $E > 100$ МэВ будут наблюдаться на Земле через 20 мин и более.

Условия выхода ускоренных протонов в МП определяются параметрами КВМ — направлением распространения (угол PA) и скоростью первого появления в поле зрения коронографа и телесным углом. Для гарантированного выхода протонов в МП вместе с КВМ его скорость в поле зрения LASCO C2 должна быть $> 618/1.5 = 412$ км/с. Скорость первого появления определяется режимом ускорения КВМ и зависит от “хромосферных эффектов”. Так как величина ускорения КВМ ограничена ~ 10 км/с², то скорость первого появления КВМ определяет необходимую минимальную длительность его ускорения ~ 1 мин [Струминский и др., 2021]. Параметры КВМ можно определить только после регистрации двух положений в поле зрения коронографа. Так как скважность наблюдений КВМ коронографом LASCO C2 12 мин, то невозможно использовать эти данные для предсказания момента первого прихода солнечных протонов > 100 МэВ в реальном времени [Григорьева и др., 2023]. Длительное наблюдение ускорения КВМ в поле зрения коронографа LASCO, возможно свидетельствует о продолжающемся выделении энергии и ускорении частиц на постэруптивной фазе вспышки [Григорьева и Струминский, 2022].

Таким образом, мы предлагаем пять пороговых критериев, которые должны выполняться последовательно для реализации протонной вспышки:

1) по магнитному потоку; 2) по температуре вспышечной SXR-плазмы; 3) по энергии и длительности ускорения электронов; 4) по высоте развития вспышечного процесса; 5) по скорости и углу распространения КВМ. Предложенные критерии обсуждаются ниже на примере вспышек, КВМ и СПС, наблюдавшихся 2—9 августа 2011 г.

3. ИНСТРУМЕНТЫ И МЕТОДЫ

Температура (T) и мера эмиссии (EM) вспышечной плазмы были вычислены из 2-секундных интегральных потоков SXR-излучения в каналах 1—8 и 0.5—4 Å детектора КА GOES (*the Geostationary Operational Environmental Satellite*, /satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/) в пакете *SolarSoft* в однотемпературном приближении.

В данной работе мы используем только информацию о радиоизлучении, представленную в YYYYMMDDevents.txt файлах (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/NOAA/org_events_text/2011/). Эти файлы содержат информацию о начале, максимуме и конце наблюдавшегося радиоизлучения на восьми патрульных частотах Radio Solar Telescope Network (RSTN). На четырех частотах (15.4, 8.8, 4.995, 2.695 ГГц) регистрируется преимущественно гиросинхротронное излучение, на трех (610, 410, 245 МГц) — плазменное излучение, а на частоте 1415 МГц — возможен вклад обоих механизмов.

Антисовпадательная защита спектрометра на КА ИНТЕГРАЛ (*Anti-Coincidence Shield of Spectrometer on INTEGRAL — ACS SPI*) регистрирует НХР с $E > 100$ кэВ. Это могут быть как первичные фотоны, так и вторичные фотоны, рожденные в теле детектора под воздействием протонов с $E > 100$ МэВ. Защита ACS SPI представляет собой эффективный, но не калиброванный детектор НХР и протонов, который используется нами для исследования взаимосвязи солнечных вспышек и протонных событий. Данные ACS SPI доступны на сайте (<https://isdc.unige.ch/~savchenk/spiacs-online/spiacspnrc.pl>) с временным разрешением 50 мс. При одноминутном сглаживании и вычитании фона значимым становится темп счета ACS SPI менее 10 отсчетов за 50 мс. Возрастание темпа счета ACS SPI во время наблюдения солнечного радиоизлучения вызвано солнечным НХР-излучением. Моментом первого прихода СП на орбиту Земли мы считаем начало значимого возрастания темпа счета на фоне или после всплеска солнечного НХР-излучения (например, [Струминский и др., 2020; Григорьева и Струминский, 2022]).

Для контроля за интенсивностью потоков протонов меньших энергий в МП вблизи Земли мы используем данные протонных каналов 7.8—25 и 25—53 МэВ детектора EPHIN (*the Electron Proton Helium Instrument* [Müller-Mellin et al., 1995]) на борту

КА SOHO, который находится в точке Лагранжа $L1$. Данные SOHO EPHIN были взяты на сайте ([/www2.physik.uni-kiel.de/SOHO/phpeph/EPHIN.htm](http://www2.physik.uni-kiel.de/SOHO/phpeph/EPHIN.htm)). При анализе СПС мы пользуемся оценками квазимаксимальной энергии протонов E_{qm} , приведенными в каталоге (https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/docs/SPE_24_Summary_List.pdf). Значения E_{qm} дают представление о мощности солнечных событий, дают еще один единый параметр в событиях СКЛ, позволяющий проводить сравнения с другими характеристиками событий [Логачев и др., 2018].

Данные по наблюдениям KBM взяты из электронного каталога SOHO LASCO CME CATALOG ([/cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)) [Gopalswamy et al., 2009].

4. СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ И ПРОТОННЫЕ СОБЫТИЯ 2–9 АВГУСТА 2011 г. ОБСУЖДЕНИЕ

Для иллюстрации метода предсказания протонных событий в реальном времени мы выбрали период со 2 по 9 августа 2011 г. (начало роста 24-го цикла солнечной активности), когда две АО 11261 (с 26 июля) и АО 11263 (с 28 июля) демонстрировали свою активность на солнечном диске.

По всей видимости, эти АО были связаны общим магнитным полем и входили в комплекс активности, который стал источником серии вспышек 30 июля — 9 августа 2011 г. Первым значимым (балл M и более) событием в этот период стала вспышка M9.3 30 июля 2012 г. с координатами (N14E35) в АО11261, в которой SXR-плазма прогрелась до 20 МК. Это была импульсная (длительность 8 мин SXR-излучения GOES) и замкнутая вспышка, в которой не было радиоизлучения на частотах <1415 МГц, радиовсплесков II и IV типов. Первым значимым событием в АО11263, по-видимому, была вспышка M1.7 3 августа 2011 г. с координатами (N15E08), к которой SXR-плазма прогрелась до 19 МК. Это также была импульсная (длительность 6 мин SXR GOES) и замкнутая вспышка, в которой не было радиоизлучения на частотах <1415 МГц, всплесков II и IV типов.

Так как задачей работы не является анализ конфигурации и динамики магнитного поля, то будем считать, что с момента вспышки M9.3 30 июля 2012 г. реализовались условия, предложенные в работе Ишкова [2023] для вспышки нового магнитного потока в АО11261 (и в АО11263 с момента вспышки M1.7 3 августа 2011 г.). Поэтому, через несколько дней мы вправе ожидать продолжение вспышечной активности.

Действительно, с 2 по 9 августа 2011 г. было зарегистрировано 2 солнечных протонных события (СПС), в которых поток протонов с энергиями >10 МэВ превышает >10 PFU, согласно каталогу

(<https://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/>) и 4 СПС с потоком протонов >10 МэВ, согласно каталогу (https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/docs/SPE_24_Summary_List.pdf). Временные профили потоков протонов в дифференциальных каналах 7.8–25 и 25–53 МэВ детектора SOHO/EPHIN и температуры SXR-плазмы за весь исследуемый период показаны на рис. 1.

В табл. 1–3 приведены характеристики вспышек, чья SXR-температура преодолела порог 12 МК (горизонтальная стрелка). Эти вспышки могли стать протонными, они выделены номерами на рис. 2a, б и г.

Информация взята из сводных отчетов о солнечной активности, составленных Центром предсказания космической погоды NOAA (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/NOAA/org_events_text/2011/) и каталога LASCO ([/cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)).

На рис. 1 во временных профилях интенсивности протонов (SOHO/EPHIN) видно 5 возрастных, связанных с родительскими солнечными вспышками, а наибольшее 6-е возрастание (максимум потока протонов за этот период) было вблизи момента SC (внезапное начало магнитной бури) 5 августа (рис. 26). Возрастание 5 августа, по всей видимости, связано с модуляцией уже существующего потока протонов в МП пространстве вблизи распространяющихся ударных волн (штормовые частицы), оно является аналогом “Rogue events” [Kallenrode and Cliver, 2001], но значительно меньшей интенсивности.

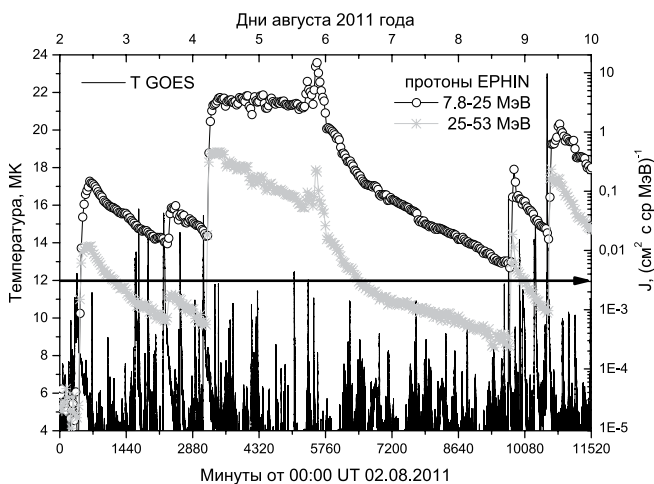


Рис. 1. Период со 2 по 9 августа 2011 г. (верхняя горизонтальная шкала — дни августа, нижняя — минуты с 00:00 UT 2 августа 2011 г.). Температура вспышечной плазмы, вычисленная по данным SXR-детектора GOES — черная кривая. Черная стрелка показывает пороговую температуру вспышечной плазмы 12 МК для ускорения протонов. Интенсивность протонов в дифференциальных каналах детектора EPHIN/SOHO 7.8–25 МэВ (черные открытые кружки) и 25–53 МэВ (серые звездочки).

Таблица 1. Характеристики вспышек $T > 12$ МК за 2—3 августа 2011 г. (см. рис. 2а)

А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И	К
1	02/08 M1.4 12.3МК	1261 N14W15	0519 0619 0648	0608 0608 0609	0559 0609 U0649	x — no p +	0636 712 296	0617 //// 0628	0612 //// 0946
2А	03/08 M1.1 13.5МК	1261 N17W24	0308 0337 0351	no	no	no	no	no	no
2Б	03/08 M1.7 15.7МК	1263 N15E08	0429 0432 0435	0431 0431 0431	no	no	no	no	no
3	03/08 C1.1 8.3МК	1261 N15W27	0642 0646 0649	no	no	no	no	no	no
4	03/08 C8.7 14.4МК	1261 N15W29	0738 0758 0806	no	no	no	no	no	no
5	03/08 M6.0 15.6МК	1261 N16W30	1317 1348 1410	1327 * 1328 1335	1331 1334 1335	no	1400 610 316	1352 //// 1344	1330 //// A2359
6	03/08 C8.5 14.5МК	1261 N13W36	1923 1930 1942	no	1933 1933 1933	no	no	no	no

Таблица 2. Характеристики вспышек $T > 12$ МК за 4—5 августа 2011 г. (см. рис. 2б)

А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И	К
1	04/08 M9.3 15.5МК	1261 N19W36	0341 0357 0404	0349 0353 0402	0351 0356 0423	X + p +	0412 1315 296	0354 //// 0403	0400 //// 1750
2	05/08 C2.0 12.4МК	1263 N19W24	1238 1245 1257	no	no	no P mod	no	no	no

Таблица 3. Характеристики вспышек $T > 12$ МК за 8—9 августа 2011 г. (см. рис. 2в)

А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И	К
1	08/08 M3.5 16.3МК	1263 N16W61	1800 1810 1818	1803 1803 1805	1803 1804 1826	no	1812 1343 276	1803 //// 1816	no
2А	08/08 C7.7 14.2МК	1263	2200 2209 2220	no	no	no	no	no	no
2Б	08/08 C5.3 11.5МК	1263	2302 2322 2359	no	no	no	2312 1070 275	no	no
3	09/08 M2.5 15.5МК	1263 N18W68	0319 0354 0408	no	no	no-	0348 1146 275	no	no
4	09/08 X6.9 23МК	1263 N17W69	0748 0805 0808	0801 0803 0807	0800 0802 0809	x + p +	0812 1610 280	0801 //// 0816	no

Примечание: А — номер вспышки на различных панелях рис. 2, буквы разделяют сливающиеся вспышки; Б — дата, рентгеновский балл и максимальная температура; В — номер активной области и координаты; Г — SXR вспышка GOES время UT (начало, максимум, конец); Д — микроволновое излучение 15.4 ГГц время UT (RSTN, начало, максимум, конец) * — выделен случай, когда нет информации о 15.4 ГГц; Е — плазменное излучение 245 МГц время UT (RSTN, начало, максимум, конец); Ж — регистрация ACS SPI солнечного HXR излучения и солнечных протонов >100 МэВ; З — время UT первого появления КВМ в поле зрения LASCO и средняя скорость км/с, угол PA; И — II тип радиоизлучения (начало и конец UT); К — IV тип радиоизлучения (начало и конец UT). Толстым шрифтом выделены случаи возрастания протонного сигнала EPHIN.

Из вспышек 2—3 августа 2011 г. явные протонные возрастания выдали только две вспышки (1) и (5) (см. табл. 1 и рис. 2а), которые показали $T > 12$ МК, развитие в областях с плазменной частотой менее 245 МГц, скорость KBM, близкую к 618 км/с. Несмотря на четко выраженный вспышечный источник (5) в каталоге (https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/docs/SPE_24_Summary_List.pdf) событие (5) отмечено как второй максимум события (1) с максимальной интенсивностью 0.55 PFU и квазимаксимальной энергией 70 МэВ, как не преодолевшее порог 1 PFU. Вспышки (2а), (2б), (3) и (4) были замкнутыми, они не развивались вверх в корону, не сопровождалась СПС и KBM.

Авторы работы [Zuccarello et al., 2014] рассмотрели эволюцию магнитного поля в АО 11261 с 02:00 UT 3 августа по 04:00 UT 4 августа, которая привела к эрупции волокна и вспышке (1) в табл. 2. По мнению авторов ключевыми были события: (2) — стали видны большое и малое волокна, (3) — активация малого волокна и (5) — эрупция малого волокна (см. табл. 1 и рис. 3а). По непонятным причинам событие (1) 2 августа не рассматривалось в работе [Zuccarello et al., 2014]. В нашей концепции развития эруптивных вспышек эрупция жгута не является необходимым условием.

Из вспышек 4—5 августа 2011 г. (табл. 2 и рис. 2б) явное протонное возрастания связано только со вспышкой (1), которая показала $T > 12$ МК, развитие в областях с плазменной частотой менее 245 МГц, скорость KBM более 1300 км/с. В этой вспышке ускорялись протоны с энергией выше пороговой энергии генерации π^0 -мезонов. В работе [Altynsev et al., 2019] рассматривается самое начало импульсной фазы, в которой авторы оценили время ускорения электронов (порядка десятка мс) в отдельных импульсах и считают этот факт аргументом против стохастического ускорения. Однако время прихода первых протонов — позднее 20 мин относительно выбранного нуля — свидетельствует о стохастическом “медленном” ускорении. Вспышка (2) 5 августа (табл. 2 и рис. 2б) не удовлетворяет критериям: по длительности $T > 12$ МК, плазменному и микроволновому (HXR) излучению и в ней ожидаемо не было СПС и KBM.

Ни одна из вспышек 6—7 августа 2011 г. (рис. 2в) не преодолела порог по температуре 12 МК. В эти дни не наблюдались KBM со скоростями более локальной второй космической скорости (на поверхности Солнца, 618 км/с), а потоки протонов, зарегистрированные в каналах SOHO/EPHIN, монотонно спадали.

Четыре вспышки 8—9 августа 2011 г. (рис. 2д и табл. 3), произошедшие в АО11263 сопровождалась KBM. События (1) и (4) отмечены как протонные в каталоге ([https://swx.sinp.msu.ru/apps/](https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/docs/SPE_24_Summary_List.pdf)

[sep_events_cat/docs/SPE_24_Summary_List.pdf](https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/docs/SPE_24_Summary_List.pdf)) с квазимаксимальными энергиями 100 и 650 МэВ соответственно. Они удовлетворяют критериям по плазменному и нетепловому излучению. Только во вспышке (4) ускорялись протоны с энергией более порога генерации π^0 -мезонов, именно после нее было протонное возрастание темпа счета ACS SPI. Вспышки (2а), (2б) и (3) (рис. 2д и табл. 3) не удовлетворяют критериям по плазменному и нетепловому излучению для ускорения протонов > 100 МэВ. Мы не знаем, какая именно из двух вспышек, или (2а), не сопровождавшаяся KBM, или (2б) с температурой SXR-плазмы < 12 МК, дали вклад в поток протонов 7.8—25 МэВ, зарегистрированные SOHO/EPHIN.

На рис. 3 показаны кривые темпа счета ACS SPI за 50 мс (сглаженные средние за 1 мин, фон вычтен) относительно указанного нулевого времени UT 2 августа (светло-серая кривая), 4 августа (серая кривая), 5 августа (тонкая черная кривая) и 9 августа (черная кривая) 2011 г. Протонные возрастания 2 и 4 августа с квазимаксимальной энергией 120 и 500 МэВ наблюдались позднее 20 мин и соответствуют “медленному” ускорению электронов. Протонное возрастание 9 августа с квазимаксимальной энергией 650 МэВ — раннее (менее 20 мин) и соответствует “быстрому” ускорению [Григорьева и др., 2023], оно показало наибольшее возрастание темпа счета ACS SPI первый час после нуля. Событие 9 августа 2011 г. не дало GLE, так как не хватило времени для ускорения необходимого числа протонов с энергией выше порога атмосферного обрезания [Григорьева и Струминский, 2022].

Таким образом, детальное рассмотрение пяти родительских вспышек благоприятно расположенных для наблюдения СПС (давших видимый вклад в потоки протонов, зарегистрированные SOHO/EPHIN) показывает, что все они выделялись тремя наблюдательными признакам:

1) температура вспышечной плазмы T , вычисленная по данным двух каналов детектора GOES мягкого рентгеновского излучения была > 12 МК в течение двух и более минут;

2) плотность плазмы соответствовала плазменным частотам < 610 МГц (RSTN);

3) ускорение KBM (SOHO_LASCO) до скоростей больше локальной второй космической скорости (618 км/с на поверхности Солнца).

Отличительной особенностью вспышек, в которых ускорялись протоны с энергией $E > 300$ МэВ (наблюдения СПС (https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/docs/SPE_24_Summary_List.pdf) и γ -излучения с энергией $E > 100$ МэВ (FermiLAT, [Ajello et al., 2021]), был четвертый признак: 4) генерация HXR-излучения с энергией $E > 100$ кэВ длительностью > 5 мин, которое уверенно регистрировалось детекторами RHESSI и ACS

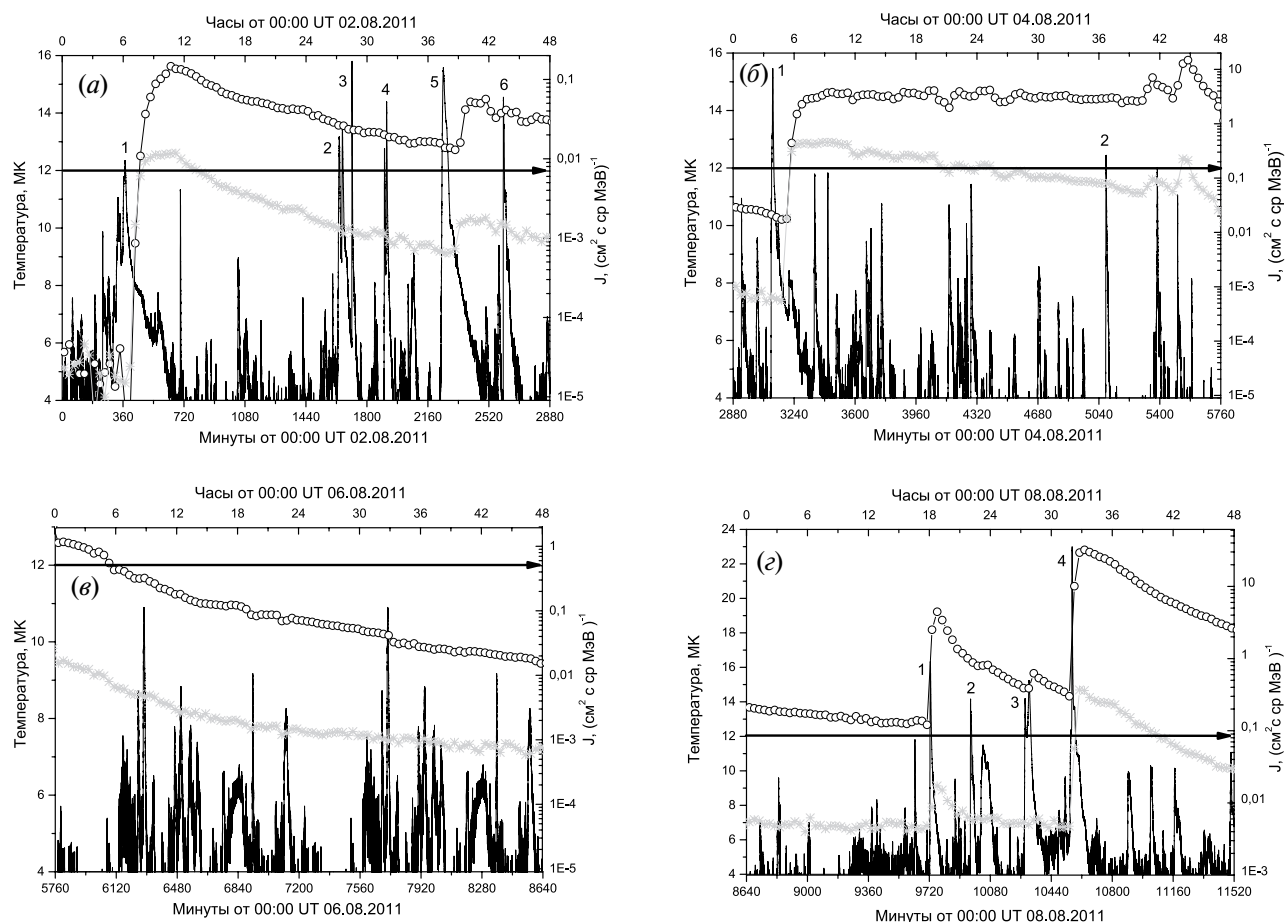


Рис. 2. Обозначения как на рис. 1. Период со 2 по 9 августа 2011 г. разбит на отрезки по 2 дня: (а) 2—3 августа, (б) 4—5 августа, (в) 6—7 августа и (г) 8—9 августа. Верхняя горизонтальная шкала — часы, а нижняя — минуты. Цифры на каждой панели соответствуют номерам вспышек в табл. 1—3.

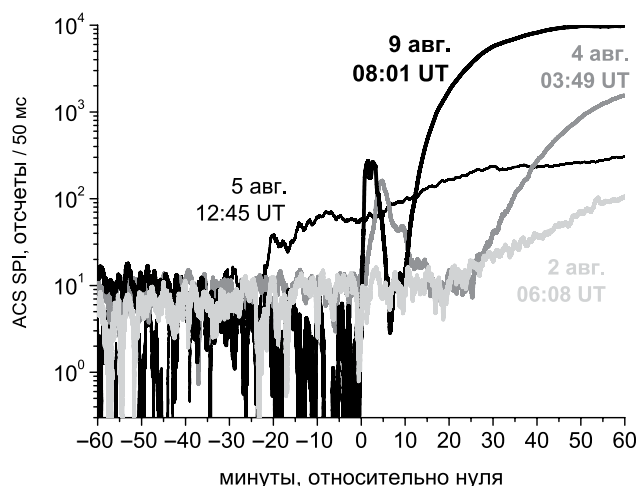


Рис. 3. Темп счета ACS SPI за 50 мс (сглаженные средние за 1 мин, фон вычтен) относительно указанного нулевого времени UT в событиях 2 (светло-серая кривая, протонный сигнал после 25 мин), 4 (серая кривая, HXR 0—15 мин, солнечные протоны после 25 мин), 5 (тонкая черная кривая, модуляция потока ГКЛ и СКЛ после минус 25 мин) и 9 (черная кривая, HXR 0—7 мин, солнечные протоны после 10 мин) августа 2011 г.

SPI. Именно эти два события 4 и 9 августа 2011 г. отвечают критерию СПС 10 PFU, согласно каталогу (<https://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/>).

По нашему мнению, эти четыре особенности вместе являются необходимыми и достаточными наблюдательными условиями для предсказания в реальном времени наиболее опасных протонных вспышек и последующих СПС. Для количественного предсказания времени начала, максимума и величины протонного потока, а также его флюенса необходимы статистические регрессионные модели, основанные на всех перечисленных характеристиках прошедших СПС, которые еще предстоит сделать.

5. ВЫВОДЫ

Рассмотрены необходимые и достаточные наблюдательные признаки для предсказания в реальном времени наиболее опасных протонных вспышек и последующих СПС.

Для реализации предложенного метода необходимы патрульные наблюдения:

1) магнитного поля активных областей (всплытие потока) и общего магнитного поля Солнца, которые позволят предсказать начало вспышечной активности за несколько дней до основных событий (магнитографы наземного и космического базирования для непрерывного наблюдения Солнца 24 ч в день);

2) мягкого рентгеновского излучения в двух каналах для вычисления температуры и меры эмиссии плазмы, которые покажут преодоление порога по температуре SXR-плазмы, необходимого для начала ускорения протонов (за несколько десятков минут до начала HXR-излучения);

3) радиоизлучения на плазменных частотах (<1000 МГц), которое покажет развитие вспышечного процесса по высоте, ведущее к КВМ, за несколько минут до начала II и IV типов радиоизлучения;

4) жесткого рентгеновского излучения >100 кэВ и/или микроволнового излучения (ГГц), которые покажут интенсивность и длительность работы ускорителя электронов (единицы и десятки минут до начала протонного возрастания на орбите Земли);

5) кинематических параметров КВМ, которые определяют условия выхода ускоренных протонов в гелиосферу (единицы часов до максимума интенсивности протонов на Земле).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят участников космических экспериментов GOES, ACS SPI, SOHO/EPHIN, SOHO/LASCO за вложенный труд и предоставление открытого доступа к данным.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа была поддержана субсидиями по темам “Плазма” (АБС и АМС) в ИКИ РАН и “МАС” (ИЮГ) в ГАО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белов А.В. Вспышки, выбросы, протонные события // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57. № 6. С. 783—793.
<https://doi.org/10.7868/S0016794017060025>
- Герштейн С.С. Механизм коллективного ускорения солнечных космических лучей // Геомагнетизм и аэрономия. 1979. Т. 19. № 2. С. 202—210.
- Григорьева И.Ю., Струминский А.Б., Логачев Ю.И., Садовский А.М. Корональное распространение солнечных протонов во время и после их стохастического ускорения // Космич. исслед. 2023. Т. 61. № 3. С. 230—241.
<https://doi.org/10.31857/S0023420622600246>
- Григорьева И.Ю., Струминский А.Б. Формирование источника солнечных космических лучей в эруптивных вспышках X6.99 августа 2011 года M5.117 мая 2012 года // Астрон. журн. 2022. Т. 99. № 6. С. 486—495.
<https://doi.org/10.31857/S0004629922060044>
- Ишков В.Н. Прогноз солнечных вспышечных явлений: солнечные протонные события // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 7. С. 1010—1013.
- Кузнецов Н.В. Радиационные условия на орбитах космических аппаратов. Гл. 3.9 // Модель космоса: научно-информационное издание в 2 т. Т. 1: Физические условия в космическом пространстве // Ред. М.И. Панасюк, Л.С. Новиков. М.: КДУ, 2007. С. 627—641.
- Логачев Ю.И., Базилевская Г.А., Дайбог Е.И., Ишков В.Н., Лазутин Л.Л., Сухова Г.М. Новый параметр в описании событий СКЛ — Энергия баланса между солнечными и галактическими протонами // Ядерная физика. 2018. Т. 81. № 3. С. 371—376.
<https://doi.org/10.7868/S00440027180301211>
- Лысенко А.Л., Фредерикс Д.Д., Флейшман Г.Д. и др. Рентгеновское и гамма-излучение солнечных вспышек // УФН. 2020. Т. 190. С. 878—894.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.06.038757>
- Нымник Р.А. Модель солнечных космических лучей. Гл. 2.7 // Модель космоса: научно-информационное издание в 2 т. Т. 1: Физические условия в космическом пространстве / Ред. М.И. Панасюк, Л.С. Новиков. М.: КДУ, 2007. С. 402—416.
- Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. М.: Атомиздат, 1979. С. 210.
- Струминский А.Б., Садовский А.М., Григорьева И.Ю. Расширение источника мягкого рентгеновского излучения и “магнитная детонация” в солнечных вспышках // Письма в АЖ. 2023. Т. 49. № 11. С. 806—818.
- Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И., Садовский А.М. Солнечные электроны и протоны в событиях 4—10 сентября 2017 года и сопутствующие явления // Физика плазмы. 2020. Т. 46. № 2. С. 139—153.
<https://doi.org/10.31857/S0367292120020134>
- Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И., Садовский А.М. Связь между длительностью и величиной ускорения корональных выбросов массы // Геомагнетизм и аэрономия. 2021. Т. 61. № 6. С. 683—693.
<https://doi.org/10.31857/S001679402105014X>
- Черток И.М. Диагностический анализ солнечных протонных вспышек сентября 2017 г. по их радиовсплескам // Геомагнетизм и аэрономия. 2018. Т. 58. № 4. С. 471—478.
- Цап Ю.Т., Мельников В.Ф. Температура столкновительной плазмы и бетатронное ускорение квазитепловых

- электронов в солнечных вспышках // Письма в Астрон. журн. 2023. Т. 48. № 4. С. 289—209.
- Ajello M., Baldini L., Bastieri R., et al. First Fermi-LAT solar flare catalog // *Astrophys. J. Suppl.* 2021. V. 252. P. 13. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/abd32e>
- Alberti L.M., Cliver E.W., Storini M., Consolini G., Lepreti F. Solar activity from 2006 to 2014 and short-term forecasts of solar proton events using the ESPERTA model // *Astrophys. J.* 2017. V. 838. P. 59. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa5cb8>
- Altyntsev A.T., Meshalkina N.S., Lysenko A.L., Fleishman G.D. Rapid variability in the SOL2011—08—04 flare: implications for electron acceleration // *Astrophys. J.* 2019. V. 883. P. 38. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab380>
- Aschwanden M.J. The localization of particle acceleration sites in solar flares and CMEs // *Space Sci. Rev.* 2006. V. 124. P. 361—372.
- Balch C.C. Updated verification of the Space Weather Prediction Center's solar energetic particle prediction model // *Space Weather.* 2008. V. 6. P. S01001. <https://doi.org/10.1029/2007SW000337>
- Belov A., Kurt V., Mavromichalaki H., Gerontidou M. Peak-size distributions of proton fluxes and associated soft X-ray flares // *Sol. Phys.* 2007. V. 246. № 2. P. 457—470.
- Garcia H.A. Temperature and emission measure from GOES soft X-ray measurements // *Sol. Phys.* 1994a. V. 154. P. 275—308. <https://doi.org/10.1007/BF00681100>
- Garcia H.A. Temperature and hard X-ray signatures for energetic proton events // *Astrophys. J.* 1994b. V. 420. P. 422—432. <https://doi.org/10.1086/173572>
- Garcia H.A. Forecasting methods for occurrence and magnitude of proton storms with solar soft X-rays // *Space Weather.* 2004. V. 2. P. S02002. <https://doi.org/10.1029/2003SW000001>
- García-Rigo A., Núñez M., Qahwaji R., Ashamari O., Jiggins P., Pérez G., Hernández-Pajares M., Hilgers A. Prediction and warning system of SEP events and solar flares for risk estimation in space launch operations // *J. Space Weather Space Clim.* 2016. V. 6. P. A28. <https://doi.org/10.1051/swsc/2016021>
- Gopalswamy N., Yashiro G., Michalek G., et al. The SOHO/LASCO CME catalog // *Earth, Moon, Planet.* 2009. V. 10. P. 4.
- Grigor'eva I. Yu., Struminsky A.B. Flares unaccompanied by interplanetary coronal mass ejections and solar proton events // *Geomagn. Aeronomy.* 2021. V. 61. Art. ID1263. <https://doi.org/10.1134/S0016793221080090>
- Hudson H.S. Threshold effect in second-stage acceleration // *Sol. Phys.* 1978. V. 57. P. 237—240.
- Hudson H.S., Simões P.J.A., Fletcher L., Hayes L.A., Hannah I.G. Hot X-ray onsets of solar flares. 2021. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa3664>, arXiv:2007.05310
- Kahler S.W., Ling A.G. A comparison of solar X-ray flare timescales and peak temperatures with associated coronal mass ejections // *Astrophys. J.* 2022. V. 934. P. 175 (P. 9). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac7e56>
- Kahler S.W., White S.M., Ling A.G. Forecasting $E > 50$ -MeV proton events with the proton prediction system (PPS) // *J. Space Weather Space Clim.* 2017. V. 7. P. A27. <https://doi.org/10.1051/swsc/2017025>
- Kahler S.W. Solar energetic particle events and the Kiplinger Effect // *Astrophys. J.* 2012. V. 747. P. 66. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/747/1/66>
- Kallenrode M.B., Cliver E.W. Rogue SEP events: observational aspects // *Proceedings of the 27th International Cosmic Ray Conference. Hamburg, Germany, August 7—15, 2001. Under auspices of the IAUPAP.* P. 3314.
- Kiplinger A. Comparative studies of hard X-ray spectral evolution in solar flares with high energy proton events observed at Earth // *Astrophys. J.* 1995. V. 453. P. 973—986. <https://doi.org/10.1086/176457>
- Klein K.-L., Trotter G., Klassen A. Energetic particle acceleration and propagation in strong CME-less flares // *Sol. Phys.* 2010. V. 263. P. 185—208. <https://doi.org/10.1007/s11207-010-9540-5>
- Ling A.G., Kahler S.W. Peak temperatures of large X-ray flares and associated CME speeds and widths // *Astrophys. J.* 2020. V. 891. P. 54 (8 p). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab6f6c>
- Müller-Mellin R., Kunow H., Fleißner V., et al. CO-STEP — Comprehensive suprathermal and energetic particle analyser // *Sol. Phys.* 1995. V. 162. P. 483.
- Miller J.A., Cargill P.J., Emslie A.G., et al. Critical issues for understanding particle acceleration in impulsive solar flares // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. № A7. P. 14631—14660. <https://doi.org/10.1029/97JA00976>
- Neupert W.M. Comparison of solar X-ray line emission with microwave emission during flares // *Astrophys. J.* 1968. V. 153. P. L59—L64.
- Núñez M. Predicting solar energetic proton events ($E > 10$ MeV) // *Space Weather.* 2011. V. 9. P. S07003. <https://doi.org/10.1029/2010SW000640>
- Núñez M. Real-time prediction of the occurrence and intensity of the first hours of >100 MeV solar energetic proton events // *Space Weather.* 2015. V. 13. P. 807—819. <https://doi.org/10.1002/2015SW001256>
- Núñez M. Predicting well-connected SEP events from observations of solar soft X-rays and near-relativistic electrons // *J. Space Weather Space Clim.* 2018. V. 8. P. A3. <https://doi.org/10.1051/swsc/2018023>
- Núñez M., Paul-Pena D. Predicting >10 MeV SEP events from solar flare and radio burst data // *Universe.* 2020. V. 6. P. 161. <https://doi.org/10.3390/universe6100161>

- Ramaty R., Colgate S.A., Dulk G.A., et al.* Energetic particles in solar flares. // Proc. of the 2nd SKYLAB Workshop on Solar Flares. Ed. P.A. Sturrock. 1978. Ch. 4. P. 117–185.
- Shih A.Y., Lin R.P., Smith D.M.* RHESSI observations of the proportional acceleration of relativistics >0.3 MeV electrons and >30 MeV protons in solar flares // *Astrophys. J.* 2009. V. 698 (2). P. L152–L157.
- Swalwell B., Dalla S., Walsch R.W.* Soalr energetic particle forcasting algorithms and associated false alarms // *Solar Phys.* 2017. V. 292. P. 173.
<https://doi.org/10.1007/s11207-017-1196-y>
- Zucca P., Núñez M., Klein K.* Exploring the potential of microwave diagnostics in SEP forecasting: The occurrence of SEPevents // *J. Space Weather Space Clim.* 2017. V. 7. P. A13.
<https://doi.org/10.1051/swsc/2017011>
- Zuccarello F.P., Seaton D.B., Mierla M., Poedts S., Rachmelz L.A., Romano P., Zuccarello F.* Observational evidence of torus instability as trigger mechanism for coronal mass ejections: the 2011 August 4 filament eruption // *Astrophys. J.* 2014. V. 785. P. 88 (11 p).
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/785/2/88>

Criteria for Forecast of Proton Events by Real-Time Solar Observations

A. B. Struminsky^{1, *}, A. A. Sadovskii¹, I. Yu. Grigorieva²

¹ *Space Research Institute of the Russian Academy of Science (IKI), Moscow, Russia*

² *Main (Pulkovo) Astronomical Observatory of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

*e-mail: astruminsky@gmail.com

The sequence of overcoming threshold values of a number of physical characteristics for proton event forecast in real time is discussed. Each characteristic adds a new physical meaning that refines the forecast. To take into account all the characteristics, the following continuous patrol observations are necessary: 1) the magnetic field of the active region (ascent of the flux) and the general magnetic field of the Sun, which can predict the onset of flare activity several days before the main events; 2) soft X-ray radiation in two channels to calculate the temperature (T) and the measure emission of plasma, which can show the preheating to $T > 10$ MK required to begin proton acceleration (the first minutes before the start of hard X-ray (HXR) radiation with energies >100 keV); 3) HXR radiation >100 keV or microwave radiation (>3 GHz), which indicate the intensity and duration of operation of the electron accelerator (units and tens of minutes before the arrival of protons with energies >100 MeV); 4) radio emission at plasma frequencies (< 1000 MHz), showing the development of the flare process upward into the corona and leading to a coronal mass ejection (CME) several minutes before the onset of radio bursts of types II and IV (the first tens of minutes before the appearance of a CME in the field of view of the coronagraph); 5) the direction and speed of CME propagation, which determine the conditions for the release of accelerated protons into the heliosphere. These stages of solar proton flares are illustrated by observations of proton events on August 2–9, 2011. To quantitatively predict the onset time, maximum and magnitude of the proton flux, as well as its fluence, it is necessary to create statistical regression models based on all of the listed characteristics of past solar proton events.