

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ 7.III.2011 И 20.II.2014

© 2021 г. Н. А. Власова<sup>1</sup>, \*, В. И. Тулупов<sup>1</sup>, В. В. Калегаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

\*nav19iv@gmail.com

Поступила в редакцию 21.09.2020 г.

После доработки 06.11.2020 г.

Принята к публикации 22.01.2021 г.

Представлены результаты исследования двух солнечных протонных событий 7.III.2011 и 20.II.2014, которые ассоциируются с солнечными вспышками, имеющими практически одинаковую мощность и находящимися на близких гелиодолготах, на западной стороне солнечного диска. Работа сделана на основе экспериментальных данных, полученных с КА ACE и ИСЗ GOES, расположенных в межпланетном пространстве в точке L1 и внутри магнитосферы Земли на геостационарной орбите, соответственно. Проведен сравнительный анализ особенностей временных профилей потоков солнечных энергичных протонов и вариаций параметров межпланетной среды: скорости и плотности солнечного ветра и величины и направления межпланетного магнитного поля. Показано, что основные различия временных профилей потоков протонов двух солнечных событий связаны с особенностями состояния межпланетной среды 7.III.2011 и 20.II.2014. Результаты сравнительного анализа временных вариаций потоков солнечных протонов с  $E > 10$  МэВ и  $E > 30$  МэВ и  $B_z$ - и  $B_x$ -компонент межпланетного магнитного поля 20.II.2014 свидетельствуют об определяющей роли структуры межпланетного магнитного поля на формирование особенностей временных профилей потоков частиц в данном событии.

DOI: 10.31857/S0023420621040063

### ВВЕДЕНИЕ

Солнечное протонное событие (СПС) – одно из наиболее ярких проявлений солнечной активности. Вариации потоков солнечных энергичных частиц (СЭЧ) являются отражением параметров источника СПС и условий распространения в неоднородной и нестационарной межпланетной среде. СЭЧ служат инструментом для диагностики их источников на Солнце, структуры и состояния межпланетного магнитного поля (ММП), солнечного ветра (СВ) и магнитосферы Земли [1–3]. Диагностическая методика базируется на исследовании особенностей движения СЭЧ в магнитных полях.

Солнечные вспышки рассматривались в качестве основного источника солнечных космических лучей (солнечных энергичных частиц) с момента их открытия в 1942 г. [4]. Постепенно накапливались факты, свидетельствующие, что корональные выбросы массы (КВМ) могут играть значительную роль в ускорении СЭЧ до больших

энергий (см., например, [5]). В случае КВМ наиболее эффективное ускорение частиц происходит в короне Солнца. В работе [6] по результатам исследования магнитной топологии на Солнце показано, что в импульсных событиях СЭЧ приобретают энергию за счет стохастического ускорения в области магнитного пересоединения и уходят в межпланетное пространство по открытым силовым линиям, а в постепенных событиях частицы ускоряются на ударных волнах КВМ, при этом силовые линии магнитного поля замкнуты. В работе [7] для события 4.IV.2000 найдено, что наиболее вероятными источниками солнечных протонов с энергией 0.1–1, 1–30 и 30–100 МэВ являются межпланетные ударные волны, корональные ударные волны и солнечная вспышка, соответственно. В настоящее время наиболее признанная точка зрения состоит в том, что солнечные энергичные частицы ускоряются и в области солнечной вспышки, и на ударных волнах КВМ [8]. Вспышка и КВМ являются двумя сторонами одного и то-

го же явления – взрывного возмущения в атмосфере Солнца с мощным выделением энергии [9].

Определяющее влияние на распространение солнечных заряженных частиц в межпланетной среде оказывает ММП [10]. В работах [11, 12] предложена физическая и расчетная модель восходящего ускоряющегося потока солнечного ветра между дискретными арочными структурами хромосферы и короны Солнца. Модель позволяет вытягивание арочных структур на Солнце и вынос их в гелиосферу с образованием петель в межпланетной среде. Образ петлевых магнитных ловушек в короне и в межпланетной среде основан на многочисленных наблюдениях арочных структур на рентгеновских фотографиях солнечной короны, на отождествлении межпланетных магнитных петель в межпланетной среде и на диагностике межпланетных петель по СЭЧ (см., например, [13]). В соответствии с моделью гелиосферные квазистационарные системы петель ММП заполняются при солнечных вспышках СЭЧ наподобие радиационных поясов Земли [14]. В работе [15] на основе результатов МГД моделирования показано, что магнитоплазменные структуры в межпланетной среде на 1 астрономической единице (а. е.) могут иметь свой источник в солнечной короне.

В работах Г.П. Любимова (см., например, [2]) показано, что СЭЧ движутся вдоль силовых линий ММП, которое коллимирует поток частиц. Сильная анизотропия потока СЭЧ, по крайней мере, на фазе роста потока – экспериментальный факт (см., например, [16, 17]). Магнитные неоднородности на пути распространения потока СЭЧ в межпланетной среде могут играть роль рассеивания, в результате поток изотропизуется. Для описания движения частиц предложено диффузионное приближение, хорошо описывающее основные характеристики изотропных потоков, а также частиц с высокой энергией ( $E > 100$  МэВ), для которых ММП слишком слабое, чтобы существенно изменить их траекторию [18]. Сильно коллимированный поток частиц не описывается в диффузионном приближении [19]. Описание экспериментальных данных потребовало усовершенствования аппарата диффузионного приближения, и были предложены коллимированная и анизотропная диффузия, введена зависимость коэффициента диффузии от времени и координат (см., например, [20]). В работе [21] предложена эмпирическая “отражательная модель” движения, накопления и модуляции частиц, созданная на основе фундаментальных физических принципов с использованием большого количества наблюдательных данных о потоках СЭЧ, о солнечном ветре и ММП. Одним из основных принципов является наличие причинно-следственной

связи между источником и его откликом, где бы они не находились: на Солнце, в гелиосфере, в околоземном пространстве. В “отражательную модель” заложено существование коронального распространения СЭЧ, то есть частицы из области солнечной вспышки могут распространяться в короне на значительные расстояния по связанным арочным системам, что дает возможность регистрации СЭЧ и от залимбовых вспышек. В работе [22] показано, что 4.IV.2019 на КА *Parker Solar Probe*, находящемся на расстоянии 0.17 а. е. от Солнца, зарегистрированы СЭЧ из активной области, расположенной на  $80^\circ$  восточнее места вытягивания силовых линий магнитного поля. Этот результат интерпретируется как существование в широкой долготной области линий магнитного поля между активной областью в фотосфере и короной.

“Отражательная модель” предполагает захват и перенос частиц в полупрозрачных магнитных ловушках, образованных силовыми линиями ММП, вытянутыми от Солнца [23, 24]. В работе [25] существование вариаций потоков юпитерианских электронов вблизи Земли объясняется, в частности, пребыванием электронов также в магнитных ловушках, имеющих форму замкнутых магнитных структур, возникающих при взаимодействии разноскоростных потоков солнечного ветра. Если эти структуры существуют длительное время, вращаясь вместе с Солнцем, то возникают коротирующие области взаимодействия (CIR – Corotating Interaction Regions), которые могут оказывать влияние на динамику СЭЧ (см., например, обзор [26]). В работе [27] описывается формирование большой магнитной полости, ограниченной токовыми слоями, в результате взаимодействия потоков СВ и/или потока СВ с гелиосферным токовым слоем. В магнитных полостях, в свою очередь, возникают динамичные мелко-масштабные магнитные острова, в которых может происходить доускорение частиц.

Межпланетная среда неоднородна (см., например, [10]). Первое упоминание о магнитоплазменных трубках в межпланетной среде было в работе [29]. По экспериментальным данным с автоматических межпланетных станций (АМС) *Марс-4*, *5*, *7* обнаружены петли магнитоплазменных трубок [29]. Петли были вытянуты солнечным ветром из активных областей Солнца, в одной из которых произошла солнечная вспышка, заселившая их солнечными частицами. В работе [30] показано существование в СВ и в ММП квазистационарных образований, состоящих из дискретных дублетных и мультиплетных структур. Образ межпланетной среды в виде ковра из магнитоплазменных трубок представлен в работе

**Таблица 1.** Параметры солнечных вспышек, корональных выбросов массы и активных областей (АО) на Солнце

Солнечные вспышки				Корональные выбросы массы					АО
дата	UT	координаты	балл	дата	UT	линейная скорость, км/с	угол	координаты	
2011.III.7	19.43	N31W53	M3.7/SF	2011.III.7	20.00	2125	Гало	N31W53	11640
2014.II.18	01.27	S16W42	C4.7	2014.II.18	01.36	779	Гало	S24E34	11976
2014.II.20	07.26	S15W73	M3.0/SN	2014.II.20	08.00	948	Гало	S15W73	11976

[31]. В работе [32] показано, что экспериментальные данные с КА *Parker Solar Probe* свидетельствуют о том, что КВМ, зарегистрированный 5.XI.2018, имел структуру в виде совокупности трубок. Способ создания образа структуры гелиосферы зависит, во многом, от выбора пространственно-временного масштаба. МГД-моделирование дает возможность описания гелиосферы, в частности, в терминах короткоживущих мелкомасштабных токовых слоев и быстрых вариаций ММП (см., например, [33]).

Цель работы – по результатам сравнительного анализа двух СПС 7.III.2011 и 20.II.2014 и условий распространения заряженных частиц в межпланетной среде в эти периоды объяснить особенности временных профилей потоков солнечных протонов 20.II.2014.

Статья посвящена памяти Германа Павловича Любимова (2.VII.1924–7.IV.2020), главного научного сотрудника Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова, доктора физ.-мат. наук, профессора, крупного специалиста в области физики Солнца и межпланетной среды, ветерана Великой Отечественной войны.

Г.П. Любимов – один из пионеров космических экспериментов, возглавлявший творческий коллектив лаборатории физики гелиосферы НИИЯФ МГУ, силами которого проведены научные исследования на автоматических межпланетных станциях серий *Зонд*, *Марс*, *Венера*, *Луна*, *Луноход*, *Вега*, *Фобос* и ИСЗ *ГРАНАТ* (в 1961–1996 гг. – 44 эксперимента).

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Исследование СПС 7.III.2011 и 20.II.2014 выполнены на основе экспериментальных данных по потокам протонов с энергиями ( $E$ )  $>10$ ,  $>30$  и  $>60$  МэВ, полученных с КА, расположенных в межпланетном пространстве и в магнитосфере Земли. КА *ACE* находится в точке либрации  $L1$  на расстоянии 1.5 млн км от Земли к Солнцу [[www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/](http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/)]. Геостационар-

ный ИСЗ *GOES-15* [<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/>] имеет орбиту на высоте  $\sim 36000$  км с наклоном  $\sim 0^\circ$  (географический экватор Земли) и расположен на долготе  $134^\circ$  W.

Использованы экспериментальные данные о параметрах солнечного ветра и ММП, полученные с КА *ACE*.

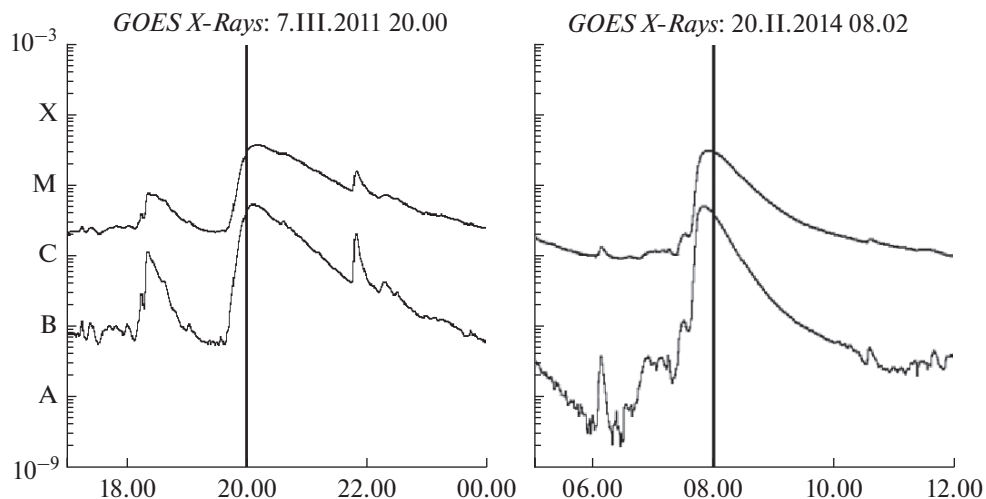
### СОЛНЕЧНЫЕ ПРОТОННЫЕ СОБЫТИЯ 7.III.2011 и 20.II.2014

Рассмотрены два СПС 7.III.2011 и 20.II.2014, которые ассоциируются с солнечными вспышками, имевшими практически одинаковую мощность и расположенными на близких долготах на западной стороне солнечного диска (табл. 1).

Солнечные вспышки 7.III.2011 и 20.II.2014 сопровождалась корональными выбросами массы (КВМ) типа гало (табл. 1). Временные профили излучения Солнца в рентгеновском диапазоне во время солнечных вспышек мало различаются по интенсивности и по продолжительности (рис. 1). Можно видеть, что профили мягкого рентгеновского излучения Солнца от вспышек имеют длительность, превышающую 1 час, что свидетельствует о том, что вспышки были постепенные (gradual) [34].

Несмотря на то, что параметры солнечных вспышек близки, временные профили потоков солнечных протонов, зарегистрированных на КА *ACE*, совершенно различны (рис. 2). Временной профиль потока частиц от вспышки 7.III.2011 имеет практически классическую форму, характерную для профиля потока от источника на западной долготы Солнца, тогда как профиль от вспышки 20.II.2014 предельно короткий по времени, с резким нарастанием и столь же резким спадом. Трудно предположить, что настолько существенные различия в профилях потоков частиц могут быть связаны с солнечными вспышками, имеющими близкие параметры.

Поток солнечных протонов распространяется от Солнца до околоземного пространства в межпланетной среде, состояние которой может быть



**Рис. 1.** Временные профили рентгеновского излучения Солнца на длинах волн 0.5–4 и 1–8 Å по данным ИСЗ GOES [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\_list/sepe/].

охарактеризовано несколькими основными параметрами: величиной ( $B$ ) и направлением или компонентами ( $B_x, B_y, B_z$ ) межпланетного магнитного поля и скоростью ( $V_{sw}$ ) и давлением ( $P_{sw}$ ) солнечного ветра. Можно видеть, что условия распространения солнечных протонов 7.III.2011 и 20.II.2014 кардинально различны (рис. 2). 7–8.III.2011 межпланетная среда практически спокойна: медленный солнечный ветер ( $V_{sw} \sim 350$  км/с) и слабое межпланетное магнитное поле ( $B \sim 5$  нТл). Возмущения в межпланетной среде наблюдались только 9–11.III.2011: были зарегистрированы структуры межпланетной среды, характеризующиеся импульсами давления солнечного ветра и усилением межпланетного магнитного поля. Можно предположить, что это могло стать причиной некоторых особенностей временного профиля потока протонов на фазе спада потока. 20.II.2014 поток солнечных протонов распространялся в возмущенной межпланетной среде с сильным магнитным полем и большой скоростью солнечного ветра.

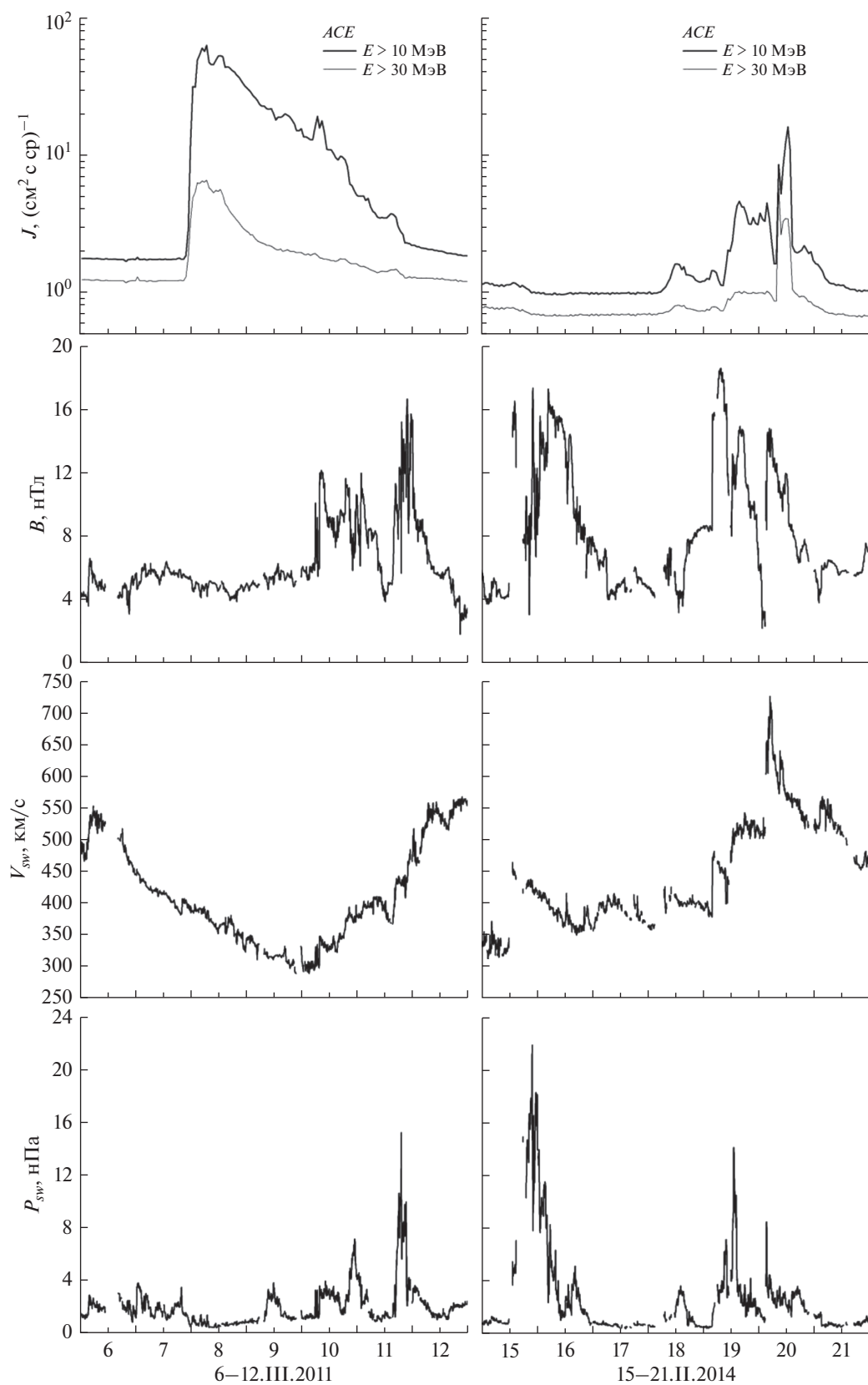
### ОБСУЖДЕНИЕ

Поток солнечных энергичных частиц от постепенной вспышки обычно может наблюдаться в широком диапазоне гелиодолгот до  $\pm 120^\circ$  [35] или даже на восточном лимбе [36]. Например, СПС 25.II.2014 было зарегистрировано несколькими космическими аппаратами, находящимися на  $\sim 1$  а. е. от Солнца, на долготах от  $153^\circ$  W до  $160^\circ$  E по отношению к Земле [37]. В случае СПС 20.II.2014 ни КА STEREO-A, который находился на долготе  $\sim 152^\circ$  W относительно Земли и, следо-

вательно, всего на  $+79^\circ$  относительно долготы солнечной вспышки, ни тем более КА STEREO-B ( $\sim 159^\circ$  E) не зарегистрировали возрастания потока солнечных частиц.

В начале СПС поток протонов бывает практически анизотропен [16, 17] и распространяется вдоль силовых линий межпланетного магнитного поля [21]. Фазы роста потоков солнечных протонов 7.III.2011 и 20.II.2014 по данным ИСЗ GOES, представленные в одном временном масштабе (в течение 12 ч от начала вспышек), можно видеть на рис. 3а и 3б. Начало солнечных вспышек отмечено: SF. Времена распространения солнечных протонов от начала вспышки до начала регистрации в околоземном пространстве различаются по длительности 7.III.2011 и 20.II.2014:  $\sim 2$  и  $\sim 1$  час, соответственно. Можно предположить, что длина силовой линии ММП, по которой солнечные протоны распространяются в межпланетной среде до Земли 20.II.2014 существенно короче, чем 7.III.2011. Об этом же свидетельствует и передний фронт временного профиля потока протонов: 20.II.2014 он круче, чем 7.III.2011 (рис. 3а и 3б).

В более чем 90% СПС фаза спада потока протонов с энергией несколько МэВ–десятки МэВ может быть описана экспоненциальным законом с характерным временем спада  $T_0 \geq 10$  ч (см., например, [38]). На рис. 3в и 3г представлены профили потоков протонов по данным КА ACE, но в разных временных масштабах, так как длительности событий 7.III.2011 и 20.II.2014 различны и составляют  $\sim 4$  сут и  $\sim 7$  ч, соответственно. Можно видеть, что 7.III.2011 потоки протонов за максимумом спадают постепенно (рис. 3в), а 20.II.2014 временные профили потоков протонов после на-



**Рис. 2.** Временные профили потоков солнечных протонов, величины ( $B$ ) ММП, скорости ( $V_{sw}$ ) и давления ( $P_{sw}$ ) солнечного ветра по данным КА ACE 6–12.ИИ.2011 и 15–21.ИИ.2014.

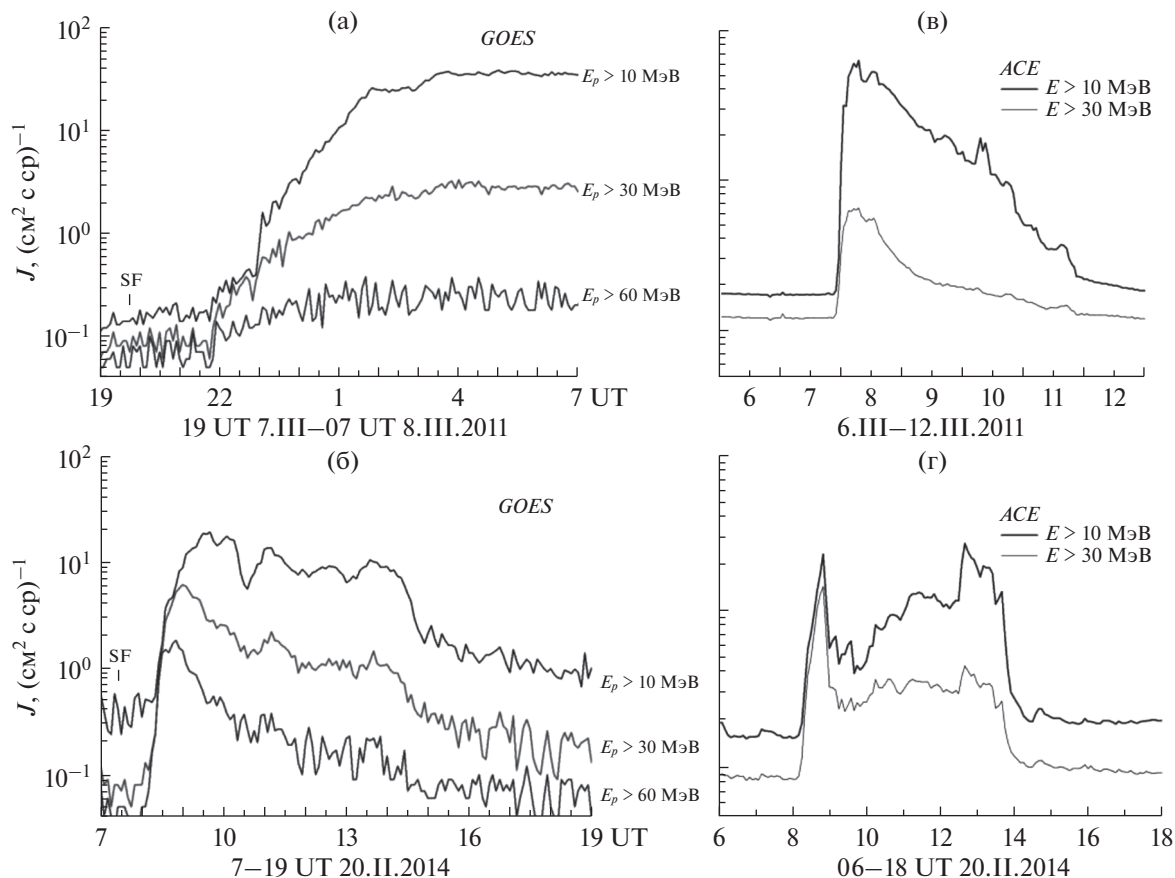


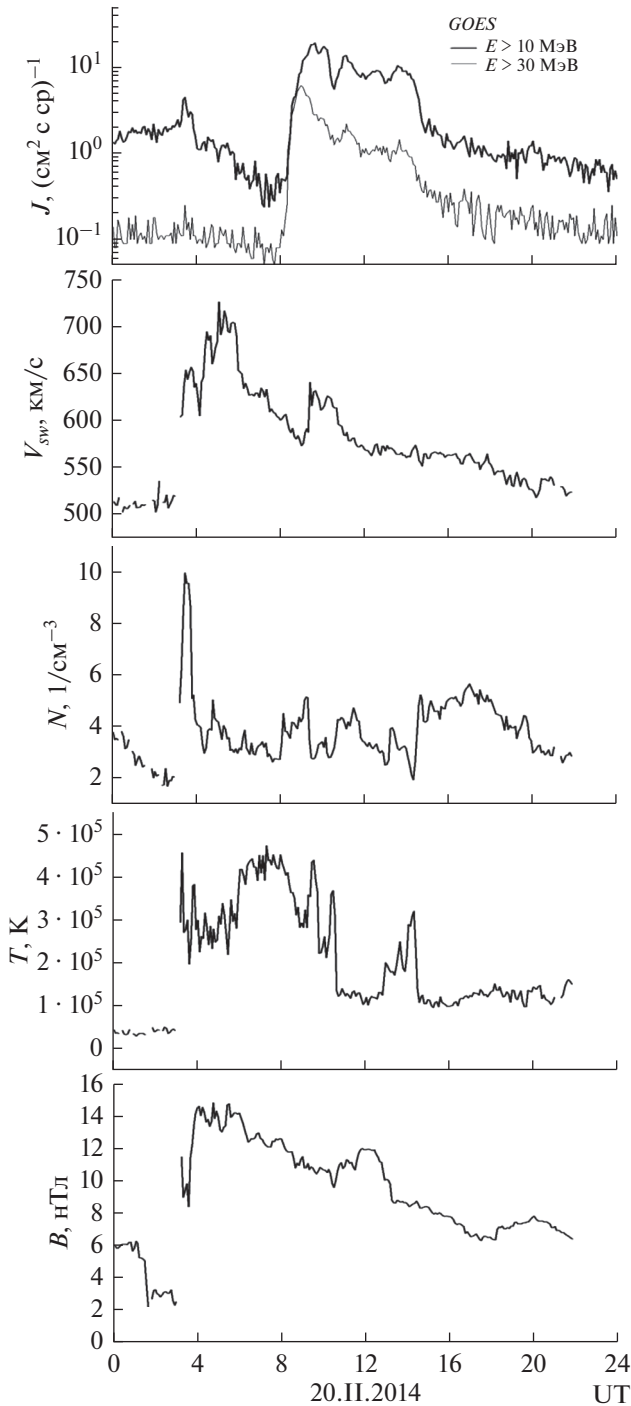
Рис. 3. Временные профили потоков протонов СПС 7.ИИ.2011 и 20.ИИ.2014 (см. текст).

чальных максимумов почти плоские в течение ~6 ч, с последующим, столь же крутым как подъем на фазе роста, спадом (рис. 3г). Это является дополнительным свидетельством необычности процесса распространения солнечных протонов в межпланетной среде 20.ИИ.2014.

20.ИИ.2014 к Земле пришел поток СВ, имеющий высокую скорость ( $V_{sw} > 700$  км/с) и большую величину ( $B \sim 15$  нТл) ММП (рис. 4). По данным [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\_list/index.html] 18.ИИ.2014 в 01.36 UT на Солнце наблюдалось извержение волокна: гелиокоординаты события – S24E34; тип КВМ – гало. По результатам моделирования [http://helioweather.net/] КВМ распространился, по крайней мере, на всю видимую часть Солнца и должен был подойти к Земле 20.ИИ.2014. Практически одновременно с КВМ в 01.27 UT 18.ИИ.2014 в той же активной области (АО11976), что и солнечная вспышка исследуемого СПС 20.ИИ.2014, происходит слабая солнечная вспышка балла C4.7 с гелиокоординатами S16W42 (табл. 1) [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\_list/]. Слабая вспышка происходит за ~2.25 дня до вспышки 20.ИИ.2014. За счет вращения Солнца АО11976,

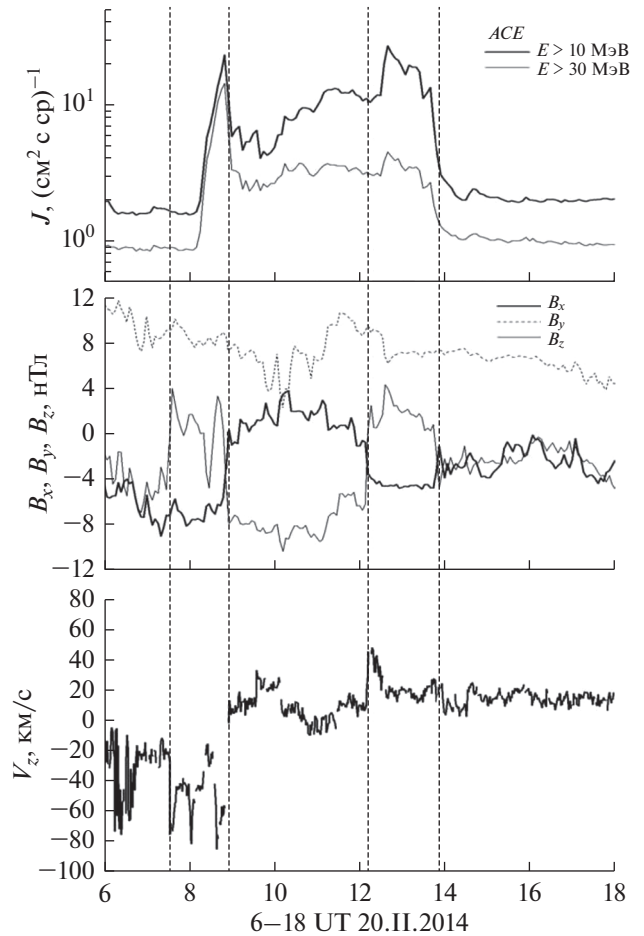
в которой произошла вспышка 18.ИИ.2014, перемещается на  $\Delta W \sim 30^\circ$ , то есть на гелиодолготу ~W73, где и происходит вспышка 20.ИИ.2014 с гелиокоординатами S15W73 (табл. 1).

Можно предположить следующий сценарий временной последовательности событий в феврале 2014 г. 18.ИИ.2014 часть силовых линий магнитного поля Солнца от слабой вспышки в АО11976 захватывается высокоскоростным потоком СВ от КВМ типа гало (табл. 1). Поток СВ вместе с силовыми линиями магнитного поля достигает околоземного космического пространства 20.ИИ.2014.  $B \sim 03$  UT 20.ИИ.2014 приборы КА ACE регистрируют приход ударной волны от данного КВМ, что проявляется как резкое увеличение скорости СВ и усиление ММП, а также как скачки плотности и температуры СВ (рис. 4). В дальнейшем скачок плотности, начало снижения температуры СВ, увеличение флуктуаций ММП в ~07.30 UT свидетельствуют о приходе КВМ. Практически одновременно, в 07.26 UT, в АО11976 происходит вспышка, которая и дала исследуемое возрастание потока солнечных протонов. Примерно в 14 UT 20.ИИ.2014 на графиках скорости, плотно-



**Рис. 4.** Временные профили потоков солнечных протонов по данным ИСЗ *GOES*, скорости ( $V_{sw}$ ), плотности ( $N$ ), температуры ( $T$ ) солнечного ветра и величины ( $B$ ) ММП 20.11.2014.

сти, температуры СВ видны скачки, которые, как мы полагаем, соответствуют заднему фронту КВМ. В это же время происходит резкий спад потока солнечных протонов, после чего идет его медленный монотонный спад. Поток солнечных прото-



**Рис. 5.** Временные профили потоков солнечных протонов по данным КА *ACE*,  $B_x$ ,  $B_y$  и  $B_z$  компонент ММП и  $V_z$ -компоненты скорости солнечного ветра в 06–18 UT 20.11.2014.

нов от вспышки 20.11.2014 распространяется в межпланетном пространстве по вытянутым высокоскоростным потоком СВ силовым линиям ММП. Длина силовой линии ММП, по которой солнечные протоны распространяются в межпланетной среде до Земли, 20.11.2014 существенно короче, чем 7.11.2011 как вследствие более высокой скорости СВ 20.11.2014, так и из-за значительного отклонения гелиошироты вспышки 7.11.2011 ( $N31$ ) от гелиошироты ( $\sim S7$ ) эклиптической точки регистрации – положения Земли. В связи с этим и более крутой фронт нарастания потока протонов 20.11.2014.

Таким образом, 20.11.2014 солнечные протоны достигли Земли внутри сложной межпланетной структуры – внутри КВМ. Можно видеть (рис. 5), что наиболее яркие особенности временного профиля потоков солнечных протонов коррелируют по времени с вариациями скорости СВ и, главным образом, с вариациями  $B_x$  и  $B_z$  компонент



ММП. В работе [30] показано, что фундаментальной структурой в солнечной атмосфере и в гелиосфере является магнитоплазменная трубка. Можно предположить, что резкие изменения величин  $B_x$  и  $B_z$  компонент ММП (рис. 5) являются границами магнитоплазменных трубок, ориентированных различным образом (границы трубок показаны тонкими пунктирными вертикальными линиями). Расчет на основе реальной скорости межпланетной структуры (скорости распространения КВМ) 20.И.2014 (рис. 5) показал, что размер трубок составляет  $\sim 3 \cdot 10^6$ ,  $\sim 5 \cdot 10^6$  и  $\sim 3.3 \cdot 10^6$  км. Ларморовский радиус движения протонов с энергией  $\sim 10$ – $30$  МэВ в магнитном поле с напряженностью  $\sim 5$ – $10$  нТл составляет  $\sim (1$ – $5) \cdot 10^3$  км. Результат расчета размера трубок для 20.И.2014 удивительным образом согласуется с размерами магнитных трубок, полученными по экспериментальным данным с АМС *Marс-4, 5, 7* –  $\sim 10^6$  км [29]. Исследование вспышки 19.И.1990 по экспериментальным данным с ИСЗ *ГРАНАТ* позволили обнаружить на 1 а. е. пучки трубок с характерным размером  $(0.5$ – $2) \cdot 10^6$  км и с минимальным –  $0.03 \cdot 10^6$  км [39]. Результаты статистического анализа относительных амплитуд вариаций различных параметров межпланетной среды по 128-секундным экспериментальным данным с КА *ACE* за 7 лет измерений свидетельствовали о существовании магнитных трубок, стенки которых ассоциировались с большими амплитудами вариаций компонент ММП и вектора скорости СВ [31].

Таким образом, регистрация в околоземном космическом пространстве практически плоского временного профиля СПС 20.И.2014 может быть объяснена прохождением Земли через структуру межпланетной среды, состоящую из магнитоплазменных трубок, локализованных в КВМ и содержащих потоки солнечных протонов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен сравнительный анализ двух солнечных протонных событий 7.И.2011 и 20.И.2014, которые ассоциируются с солнечными вспышками, близкими по мощности и расположенными на близких долготах на западной стороне солнечного диска.

Показано, что основные различия временных профилей потоков солнечных протонов 7.И.2011 и 20.И.2014 связаны с влиянием межпланетной среды на динамику потоков частиц. Результаты сравнительного анализа временных вариаций потоков солнечных протонов с  $E > 10$  и  $E > 30$  МэВ и  $B_x$  и  $B_z$  компонент межпланетного магнитного поля 20.И.2014 свидетельствуют об определяю-

щей роли структуры межпланетного магнитного поля на формирование особенностей временных профилей потоков частиц.

Полученные экспериментальные результаты подтверждают ранее высказанные предположения о том, что фундаментальной структурой в гелиосфере является магнитоплазменная трубка [29] и что распространение солнечных космических лучей в межпланетной среде преимущественно происходит в квазистационарных структурах межпланетного магнитного поля [21], а в процессе распространения солнечные протоны могут частично захватываться новыми структурами межпланетного магнитного поля [23].

Авторы выражают глубокую благодарность Ю.И. Логачеву и Н.В. Переслегиной за интерес к работе, а также за полезные замечания и предложения. Экспериментальные данные получены в *Goddard Space Flight Center NASA*: по солнечному ветру и межпланетному магнитному в *OMNIWeb: High Resolution OMNI* [[http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni\\_min.html](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html)]; по потокам солнечных протонов в *CDAWeb: the Coordinated Data Analysis Web* [<https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov>]. Информация по солнечным вспышкам и корональным выбросам массы получена в *Coordinated Data Analysis Workshops (CDAW)* [<https://cdaw.gsfc.nasa.gov>], *SOHO LASCO CME CATALOG* [[https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)], *WSA-ENLIL-DONKI-HELICATS – Solar Wind and CMEs – 2007–2019* [<http://helio-weather.net/archive/2014/02>].

Работа поддержана грантом РФФИ № 19-02-00264.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вернов С.Н., Тверской Б.А., Любимов Г.П. и др.* Вариации интенсивности космических лучей и солнечный ветер // *Известия АН СССР. Сер. физ.* 1975. Т. 39. № 2. С. 340–349.
2. *Любимов Г.П.* Диагностическая методика исследования межпланетного магнитного поля, плазмы солнечного ветра и их источников на Солнце // *Известия АН СССР. Сер. физ.* 2003. Т. 67. № 3. С. 353–366.
3. *Тверская Л.В.* Диагностика магнитосферы по релятивистским электронам внешнего пояса и проникновению солнечных протонов (обзор) // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 2011. Т. 51. № 1. С. 8–24.
4. *Forbush S.E.* Three unusual cosmic-ray increases possibly due to charged particles from the Sun // *Phys. Rev.* 1946. V. 70. P. 771–772. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.70.771>
5. *Lee M.A.* Coupled hydromagnetic wave excitation and ion acceleration at an evolving coronal/interplanetary shock // *Astrophysical J. Supplement Series.* 2005. V. 158. P. 38–67.



6. *Reames D.V.* Magnetic topology of impulsive and gradual solar energetic particle events // *Astrophysical J.* 2002. V. 571. P. L63–L66.
7. *Laurenza M., Consolini G., Storini M. et al.* On the spectral shape of SEP events: an extreme value statistics approach // *Proc. AIP Conf.* 2013. V. 1539. P. 219–222. <https://doi.org/10.1063/1.4811027>
8. *Vazilevskaya G.A.* Once again about origin of the solar cosmic rays // *J. Physics: Conf. Series.* 2017. V. 798. P. 012034. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/798/1/012034>
9. *Мирошниченко Л.И.* Солнечные космические лучи: 75 лет исследований // *Успехи физических наук.* 2018. Т. 188. № 4. С. 345–376.
10. *Паркер Е.Н.* Динамические процессы в межпланетной среде / Под ред. Дормана Л.И. М.: МИР, 1965.
11. *Любимов Г.П.* Вытягивание магнитных петель в атмосфере Солнца // *Астрономический циркуляр АН СССР.* 1986. № 1441. С. 5–6.
12. *Любимов Г.П.* Восходящие потоки в атмосфере Солнца и формирование солнечного ветра // *Космич. исслед.* 2006. Т. 44. № 2. С. 118–135.
13. *Любимов Г.П., Щербовский Б.Я.* Определение характерных структур межпланетного магнитного поля солнечного ветра 8 сентября 1973 г. по данным АМС *Марс-7* // *Космич. исслед.* 2003. Т. 41. № 5. С. 549–552.
14. *Любимов Г.П.* Локальные радиационные пояса Солнца // *Космич. исслед.* 2002. Т. 40. № 6. С. 610–615.
15. *Burkholder B.L., Otto A., Delamere P.A. et al.* Magnetic connectivity in the corona as a source of structure in the solar wind // *J. Geophysical Research: Space Physics.* 2019. V. 124. P. 32–49. <https://doi.org/10.1029/2018JA026132>
16. *Мирошниченко Л.И., Петров В.М.* Динамика радиационных условий в космосе. М.: Энергоатомиздат, 1985.
17. *Bütikofer R., Flückiger E.O., Desorgher L. et al.* The extreme solar cosmic ray particle event on 20 January 2005 and its influence on the radiation dose rate at aircraft altitude // *Sci. Total Environ.* 2008. V. 391. № 2–3. P. 177–183. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.10.021>
18. *Дорман Л.И., Мирошниченко Л.И.* Солнечные космические лучи. М.: Физматгиз, 1968.
19. *Reames D.V., Ng C.K., Berdichevsky D.* Angular distributions of solar energetic particles // *Astrophysical J.* 2001. V. 550. P. 1064–1074.
20. *Lupton J.E., Stone E.C.* Solar Flare Particle Propagation: Comparison of a new Analytic Solution with Spacecraft Measurements // *J. Geophys. Res.* 1973. V. 78. № 7. P. 1007–1018. <https://doi.org/10.1029/JA078i007p01007>
21. *Любимов Г.П.* Отражательная модель движения СКЛ в петлевых ловушках // *Астрономический циркуляр АН СССР.* 1988. № 1531. С. 19–20.
22. *Leske R.A., Christian E.R., Cohen C.M.S. et al.* Observations of the 2019 April 4 Solar Energetic Particle Event at the Parker Solar Probe // *Astrophysical J. Supplement Series.* 2020. V. 246. № 2. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab5712>
23. *Любимов Г.П., Григоренко Е.Е.* Об отражательной модели солнечных космических лучей // *Космич. исслед.* 2007. Т. 45. № 1. С. 12–19.
24. *Тулупов В.И., Григоренко Е.Е., Власова Н.А. и др.* Движение и перенос солнечных космических лучей в гелиосферных ловушках на примере события 28–31.I.2001 // *Космич. исслед.* 2012. Т. 50. № 6. С. 427–434.
25. *Дайбог Е.И., Кечкемети К., Лазутин Л.Л. и др.* 27-дневная периодичность потоков юпитерианских электронов на орбите Земли // *Астрономический журнал.* 2017. Т. 94. № 12. С. 1062–1070. <https://doi.org/10.7868/S0004629917120027>
26. *Richardson I.G.* Energetic Particles and Corotating Interaction Regions in the Solar Wind // *Space Science Reviews.* 2004. V. 111. P. 267–376. <https://doi.org/10.1023/B:SPAC.0000032689.52830.3e>
27. *Malandraki O., Khabarova O., Bruno R. et al.* Current sheets, magnetic islands, and associated particle acceleration in the solar wind as observed by Ulysses near the ecliptic plane // *Astrophysical J.* 2019. V. 881. № 2. P. 116. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab289a>
28. *McCracken K.G., Ness N.F.* The collimation of cosmic rays by the interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res.* 1966. V. 71. № 13. P. 3315. <https://doi.org/10.1029/JZ071i013p03315>
29. *Любимов Г.П., Контор Н.Н., Переслегина Н.В. и др.* Анизотропия солнечных протонов и неоднородности межпланетной среды // *Известия АН СССР. Сер. физ.* 1976. Т. 40. № 3. С. 462–470.
30. *Любимов Г.П., Переслегина Н.В.* Отображение структуры хромосферы и короны Солнца в солнечном ветре и межпланетном магнитном поле // *Астрономический журнал.* 1985. Т. 62. Вып. 4. С. 780–789.
31. *Borovsky J.E.* Flux tube texture of the solar wind: Strands of the magnetic carpet at 1 AU? // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. P. A08110. <https://doi.org/10.1029/2007JA012684>
32. *Wood B.E., Hess P., Howard R.A. et al.* Morphological reconstruction of a small transient observed by Parker Solar Probe on 2018 November 5 // *Astrophysical J. Supplement Series.* 2020. V. 246. № 2. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab5219>
33. *Maiewski E.V., Kislov R.A., Khabarova O.V. et al.* Magnetohydrodynamic Modeling of the Solar Wind Key Parameters and Current Sheets in the Heliosphere: Radial and Solar Cycle Evolution // *Astrophysical J.* 2020. V. 892. № 1. P. 12. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab712c>
34. *Cane H.V., McGuire R.E., von Rosenvinge T.T.* Two classes of solar energetic particle events associated with impulsive and long-duration soft X-ray flares // *Astro-*

- physical J. 1986. V. 301. P. 448–459.  
<https://doi.org/10.1086/163913>
35. *Kallenrode M.-B., Cliver E.W., Wibberenz G.* Composition and azimuthal spread of solar energetic particles from impulsive and gradual flares // *Astrophysical J.* 1992. V. 391. № 1. P. 370–379.
36. *Cliver E.W., Kahler S.W., Neidig D.F. et al.* Extreme “propagation” of solar energetic particles // 24th International Cosmic Ray Conference. 1995. V. 4. P. 257–260.
37. *Lario D., Kwon R.-Y., Vourlidas A. et al.* Longitudinal properties of a widespread solar energetic particle event on 2014 February 25: evolution of the associated CME shock // *Astrophysical J.* 2016. V. 819. P. 72–94.  
<https://doi.org/10.3847/0004-637X/819/1/72>
38. *Kecskeméty K., Daibog E.I., Logachev Yu.I. et al.* The decay phase of solar energetic particle events // *J. Geophysical Research. Space Physics.* 2009. V. 114. A06102.  
<https://doi.org/10.1029/2008JA013730>
39. *Ермаков С.И., Контор Н.Н., Любимов Г.П. и др.* Вспышка солнечных космических лучей в марте 1990 г. // *Известия АН СССР. Сер. физ.* 1991. Т. 55. № 10. С. 1889–1893.