

УДК 524.1-52:523.9

## КАТАЛОГИ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ КАК ИНСТРУМЕНТ ИЗУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

© 2022 г. Н. А. Власова<sup>1, \*</sup>, Ю. И. Логачев<sup>1</sup>, Г. А. Базилевская<sup>2</sup>, Е. А. Гинзбург<sup>3</sup>, Е. И. Дайбог<sup>1</sup>,  
В. Н. Ишков<sup>4, 5</sup>, В. В. Калегаев<sup>1</sup>, Л. Л. Лазутин<sup>1</sup>, М. Д. Нгуен<sup>1</sup>, Г. М. Сурова<sup>1</sup>, О. С. Яковчук<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова, Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Россия

<sup>5</sup>Геофизический центр РАН, Москва, Россия

\*nav19iv@gmail.com

Поступила в редакцию 19.06.2021 г.

После доработки 18.08.2021 г.

Принята к публикации 25.08.2021 г.

Описаны отличительные особенности серии каталогов солнечных протонных событий (СПС) 20–24 циклов солнечной активности. Представлены результаты сравнительного анализа 23 и 24 циклов солнечной активности, выполненного по данным серии каталогов СПС. Обсуждаются возможности, которые предоставляют каталоги СПС для исследований факторов космической погоды, таких как: динамика солнечной активности, структура и состояние межпланетной среды и магнитосферы Земли.

DOI: 10.31857/S0023420622030098

### ВВЕДЕНИЕ

Солнечное протонное событие (СПС) – одно из наиболее важных проявлений солнечной активности (СА). Потоки энергичных солнечных заряженных частиц не только сами создают радиационную угрозу экипажам и технике космических миссий, но и являются возможным предвестником геомагнитных бурь, инициируемых совокупным действием на магнитосферу Земли солнечного ветра и магнитного поля коронального выброса массы (КВМ). СПС – очень сложные, разнообразные, в настоящее время недостаточно изученные и плохо предсказуемые явления. На характеристики потоков частиц, регистрируемых в околоземном космическом пространстве, влияют физические процессы генерации частиц на Солнце и состояние межпланетной среды при распространении в ней частиц. Исследование проявлений солнечной активности и ее воздействий на межпланетное пространство потребовало систематизации данных о СПС, об их источниках и о сопутствующих явлениях. Возможность определить закономерности процессов, типичные и экстремальные характеристики явлений может предоставить только большой статистический материал, собираемый в каталогах СПС.

Первый каталог СПС был составлен для 19 цикла СА (1955–1969 гг.) под руководством известных специалистов по физике Солнца Z. Svestka и P. Simon международной исследовательской группой при участии и советских ученых в 1975 г. [1]. Большой массив данных представляет наибольший интерес для научных исследований при условии однородности информации в нем. Серия однотипных каталогов, охватывающих длительные временные интервалы, призвана решать эту проблему. Каталоги СПС последующих циклов СА были созданы и опубликованы в СССР и в России (часть 20 цикла – 1964–1975 гг. [2, 3], 21 цикл – 1975–1986 гг. [4, 5], 22 цикл – 1986–1996 гг. [6], 23 цикл – 1997–2008 гг. [7], 24 цикл – 2009–2019 гг. [8]). В этой серии каталогов СПС собрана информация не только о потоках солнечных протонов, но также об источниках протонов на Солнце; о явлениях, сопутствующих СПС в оптическом, рентгеновском и радиоизлучениях Солнца; о состоянии околоземного космического пространства. Каталоги СПС созданы на основе экспериментальных данных, полученных международным научным сообществом и представленных в мировой сети. Серия каталогов СПС размещена в Мировом центре данных по солнечно-земной физике [<http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/>]. Каталог СПС

23 цикла СА является единственным российским каталогом, размещенным в Национальной базе гелиогеофизических данных США в разделе “Космическая погода” [<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/interplanetary-data/solar-proton-events/documentation/>].

В настоящее время существует ряд других каталогов СПС, в которых собрана информация о потоках протонов, в основном, с энергией более 10 МэВ. Известные нам каталоги СПС (например, [9–12]) преимущественно основаны на экспериментальных данных, полученных с одного или только двух КА, а также в ограниченных интервалах энергий и/или времени. Потоки солнечных энергичных частиц – один из основных факторов космической погоды, мониторинг которого осуществляется в центрах космической погоды. В NOAA Space Environment Services Center ведется учет всех СПС (Solar Proton Events Affecting the Earth Environment [<http://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/>]), зарегистрированных на КА только одной серии *GOES*, начиная с 1976 г. Список СПС включает основные параметры СПС (дату, время начала и максимума, поток протонов с энергией >10 МэВ, координаты предполагаемого источника – солнечной вспышки и ее мощности: оптический и рентгеновский баллы вспышки). В каталог NOAA включены события, в которых поток частиц с энергией >10 МэВ не меньше 10 частиц/(см<sup>2</sup> с ср) = 10 rfu. Если на фазе спада потока протонов одного события, при этом поток еще превышает 10 rfu, происходит другое событие, то второе в каталог не включается.

Отдельные каталоги СПС созданы на основе данных нескольких энергетических каналов КА *SOHO*, *STEREO-A*, *STEREO-B*, *HELIOS-A*, *HELIOS-B* за время функционирования каждого из КА [<https://sepserver.eu/>]. Существуют каталоги СПС 23 и 24 циклов СА, созданные по данным двух дифференциальных каналов КА *WIND* и фактически одного канала КА *SOHO* [[http://www.stil.bas.bg/SEPcatalog/homeind\\_new.html](http://www.stil.bas.bg/SEPcatalog/homeind_new.html)]. Преимуществами данных каталогов являются наличие информации о радиоизлучении в периоды СПС, а также возможность выбора событий по некоторым заданным параметрам. В работе [9] приведены информация о СПС с 1970 по 2002 г. и результаты статистического анализа этих событий. На основе протонных измерений на спутниках *GOES* и *IMP-8*, данных нейтронных мониторов и рентгеновских измерений *GOES* создана база данных с 1975 по 2003 г. (1144 протонных события с энергией >10 МэВ), объединяющая информацию о протонных возрастаниях у Земли и их возможных солнечных источниках [13]. На основе экспериментальных данных по регистрации солнечных энергичных частиц с энергией >55 МэВ на 1 а.е. космическими аппаратами *SOHO*, *ACE*, *STEREO-A* и *STEREO-B*, находящимися в широ-

ком диапазоне гелиодолгот (>45°), создан каталог СПС в 2009–2016 гг. [14].

Особую группу представляют самые мощные СПС, зарегистрированные сетью наземных нейтронных мониторов (Ground Level Enhancement, GLE). Возрастания темпа счета этих установок во время таких событий вызваны заряженными частицами с энергией выше геомагнитного и атмосферного порогов обрезания. В полярных районах на уровне моря нейтронные мониторы регистрируют вторичные частицы, в основном нейтроны, генерированные в атмосфере солнечными протонами с жесткостью выше 1 ГВ. Чувствительность современных нейтронных мониторов позволяет регистрировать потоки частиц выше ~0.05 (см<sup>2</sup> · с · ср)<sup>-1</sup>. За всю историю наблюдений, с 1942 по 2017 г. было зарегистрировано 72 таких события. Информация о GLE-событиях собрана в каталоге [<http://gle.oulu.fi/#/>]. Можно видеть временной профиль события по данным всех наземных станций или некоторых выбранных.

Цель данной работы – описать достоинства серии каталогов СПС; по экспериментальным данным, собранным в этих каталогах, определить некоторые общие закономерности и особенности 23 и 24 циклов СА; показать возможности, которые предоставляют каталоги СПС для исследований космической погоды.

## 1. КАТАЛОГИ СПС 20–24 ЦИКЛОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Серия каталогов СПС 20–24 циклов СА (в дальнейшем будем называть каталоги этой серии – просто каталоги СПС) [2–8] создана авторским коллективом научных сотрудников НИИЯФ МГУ, ФИАН, ИЗМИРАН и ИПГ. В серии каталогов СПС (вместе с первым каталогом Z. Svestka и P. Simon [1]) собрана информация практически за 6 полных 11-летних циклов солнечной активности. Самое основное достоинство этой серии в том, что каталоги СПС содержат многолетний однородный ряд экспериментальных данных – неопценный научный материал для исследования различных физических процессов в космическом пространстве.

Серия каталогов СПС имеет ряд отличий по сравнению с существующими в настоящее время другими каталогами:

– В каталоги СПС включены все события, в которых максимальный поток протонов с энергией  $E \geq 10$  МэВ не менее 1 rfu = 1 частица/(см<sup>2</sup> с ср), в отличие от других каталогов, в которых нижний порог по интенсивности потока частиц обычно составляет 10 rfu.

– Экспериментальные данные по потокам солнечных энергичных частиц представлены в широком энергетическом диапазоне: ~1–10<sup>4</sup> МэВ.

– Рассматриваются все события, если наблюдается их тесная последовательность и существует возможность определения источника солнечных частиц в конкретном событии.

– Каталоги СПС создаются по экспериментальным данным всех доступных КА, регистрирующих потоки солнечных протонов в необходимом диапазоне энергий, как в межпланетной среде, так и на околоземных орбитах, а также по данным сети наземных нейтронных мониторов (табл. 1).

– В каталоги СПС включен ряд приложений, в которых содержится пояснительная информация: сведения о космических аппаратах и приборах, регистрирующих солнечные протоны; методика определения источников возрастаний потоков солнечных протонов; определение потоков и энергетического спектра релятивистских солнечных протонов по данным нейтронных мониторов; определение квазимаксимальной энергии солнечных протонов в событии; список обозначений и сокращений по явлениям и событиям, представленным в материалах каталога. Все перечисленные выше разделы каталогов СПС имеют варианты на русском и английском языках.

– Основная часть каталога состоит из совокупности разделов, каждый из которых содержит информацию о конкретном событии (разделы представлены только на английском языке). Раздел начинается с легенды события, в которой представлены: дата события; день года; полные данные об источниках события; информация о явлениях, которые могли повлиять на наблюдаемый поток солнечных протонов. Подробное описание легенды можно прочитать в приложении к каталогу СПС (см., например, [7]).

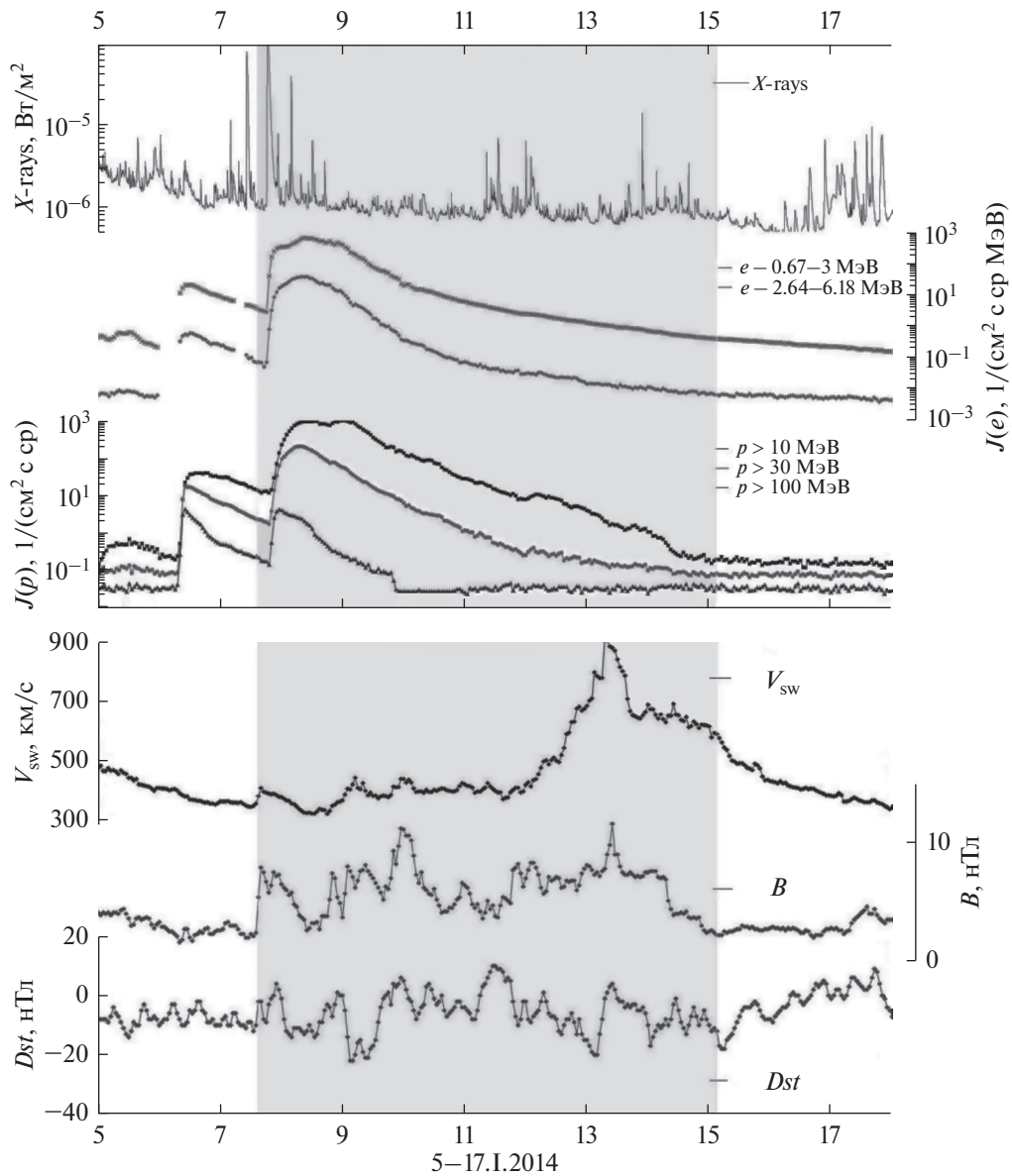
– Кроме легенды раздел, посвященный каждому СПС, содержит таблицы и графики. Графическое представление добавлено для быстрого и наглядного обзора события. На первом графике представлены временные профили не только потоков солнечных протонов, но и других параметров, характеризующих самые важные явления, связанные с рассматриваемым событием, но не включенных в основной материал каталога: рентгеновское излучение Солнца, определяющее уровень солнечной активности; поток солнечных электронов; скорость солнечного ветра и индукция магнитного поля – характеристики условий распространения протонов в межпланетной среде; *Dst*-вариация – индекс, свидетельствующий об уровне геомагнитной возмущенности и, в частности, о границах проникновения солнечных частиц в магнитосферу Земли. На рис. 1 представлен обзорный график СПС 7.I.2014, на примере которого можно видеть основные моменты, рассматриваемые в каталоге. Данное событие выбрано как типичное и в то же время наиболее показате-

льное, охватывающее основные черты всех 100 рассмотренных событий 24 цикла. Все графики охватывают несколько больший временной интервал, чем сама длительность события, для понимания предыстории события на Солнце, в межпланетном пространстве и в магнитосфере Земли, а также ситуации после события. Затухающая область на обзорном графике для каждого СПС указывает на само событие и его продолжительность. Можно видеть, что событию предшествовала солнечная активность, в результате которой наблюдались два возрастания солнечных протонов: 5.I и 6.I.2014. СПС 7.I.2014 рассматривается как отдельное событие несмотря на то, что началось на фазе спада СПС 6.I.2014. Спокойный, слегка убывающий по скорости солнечный ветер свидетельствует о практически невозмущенном пространстве, способствующем свободному распространению частиц. Можно видеть приход небольшой ударной волны к началу события. Как указано в легенде, событие наиболее вероятно ассоциируется с солнечной вспышкой X1.2/2N с гелиокоординатами S15W11, произошедшей 7.I.2014 в 18:04 UT в активной области AR11944. Интегральный поток мягкого рентгеновского излучения (1–8 Å) составил  $\sim 0.25$  Дж/м<sup>2</sup>. В каталоге приведены сведения о корональном выбросе массы (КВМ) 7.I.2014: время появления в поле зрения коронографа – 18:24 UT; скорость выброса –  $V = 1830$  км/с; угловой размер (угловая ширина) КВМ вблизи Солнца –  $\Delta\varphi = 360^\circ$ ; позиционный угол первого появления КВМ, обнаруженного коронографом LASCOSOHO, –  $dA = 231^\circ$ . Начало возрастания потока солнечных протонов зафиксировано в  $\sim 18$  UT (с точностью 1 ч). Максимальный поток протонов с энергией  $> 10$  МэВ составил  $\sim 1000$  (см<sup>2</sup> с ср)<sup>-1</sup>. Для каждого события в каталоге СПС представлены временные профили потоков протонов по экспериментальным данным с максимально возможным количеством КА. Для СПС 7.I.2014 в каталоге можно видеть временные профили потоков протонов по данным КА ACE, SOHO, Электро, GOES, Метеор, POES.

– Для каждого СПС представлены энергетические спектры интегральных потоков солнечных протонов в максимуме (максимумах) события. Понятие энергетического спектра протонов в максимуме события было введено исторически, когда предполагались практически мгновенная инжекция солнечных частиц в межпланетное пространство и дальнейшее распространение их путем диффузии. В этом случае спектр в максимуме отражает спектр частиц, ускоренных на Солнце. Развитие представлений об ускорении и распространении солнечных частиц привело к сценариям, в которых рассматривается длительное и/или многократное ускорение и сложная картина распространения частиц в короне Солнца и в межпланетной среде с учетом геометрии

**Таблица 1.** Источники экспериментальных данных каталога СПС 24 цикла СА

Космические аппараты и наземные нейтронные мониторы	Орбита	Приборы	Интегральные энергетические каналы, ( $E>$ ), МэВ	Дифференциальные энергетические каналы, МэВ
<i>ACE</i>	Точка либрации L1, 1.5 млн км	SIS	10 30	–
<i>SOHO</i>	Точка либрации L1, 1.5 млн км	LION		0.75–2 2–6
		EPHIN	50	4–8 8–25 25–53
<i>GOES</i>	Геостационарная орбита, ~36600 км	EPS	5	350–420
			10	420–510
			30	520–470
			50	
			60	
			100	
<i>Электро</i>	Геостационарная орбита, ~36600 км	SCR-E		13.7–23 23–42 42–112
			GALS-MP	600 800 1100
<i>POES</i>	Полярная орбита, ~800 км	MEPED	6.9	0.24–0.8
			16	0.8–2.5
			36	2.5–6.9
			70	
			140	
<i>POES</i> после 2015 г.				25 50 100
<i>Метеор</i>	Полярная орбита, ~800 км	SCR-1		1–100 3–10
		GALS-MP	15 25 600 800 1100	–
<i>PAMELA</i> – научный аппарат	Квазиполярная эллиптическая орбита, наклонение 70°, ~350–610 км	TRACKER	–	90–4000
Сеть нейтронных мониторов			500	



**Рис. 1.** Временные профили рентгеновского излучения Солнца по данным КА *GOES*; потоков солнечных электронов по данным КА *SOHO*; потоков солнечных протонов по данным КА *GOES*; скорости солнечного ветра ( $V_{sw}$ ) и величины межпланетного магнитного поля ( $B$ ) по данным КА *ACE* и  $Dst$ -вариации 5–17.1.2014.

магнитного поля. Принимаются во внимание диффузия, конвекция, адиабатическое охлаждение, а также (в последних работах) дрейф частиц. Безусловно, все эти факторы могут влиять на поток частиц в максимуме события и нередко приводят к наличию плоского максимума или двух-трех максимумов. Тем не менее, спектр в максимуме по-прежнему является одной из главных характеристик события, так как дает представление о первом, зачастую наиболее мощном, этапе энерговыделения на Солнце, а также, в случае нескольких максимумов, о наличии нескольких налагающихся по времени солнечных событиях. Определение этого индекса на протяжении всей

истории изучения СПС делает однородным ряд данных, характеризующих события. До настоящего времени нет полного понимания процессов, связанных с солнечными протонными событиями, и нет общепринятого параметра, которым можно было бы характеризовать мощность события. На рис. 2 для примера приведен энергетический спектр интегральных потоков солнечных протонов в максимуме одного из событий, приведенных в каталоге СПС, — 7.1.2014. Интегральные спектры строились по максимальным потокам протонов всех энергий, зарегистрированным в данном событии. Потоки протонов, регистрировавшиеся в ограниченных интервалах энергий,

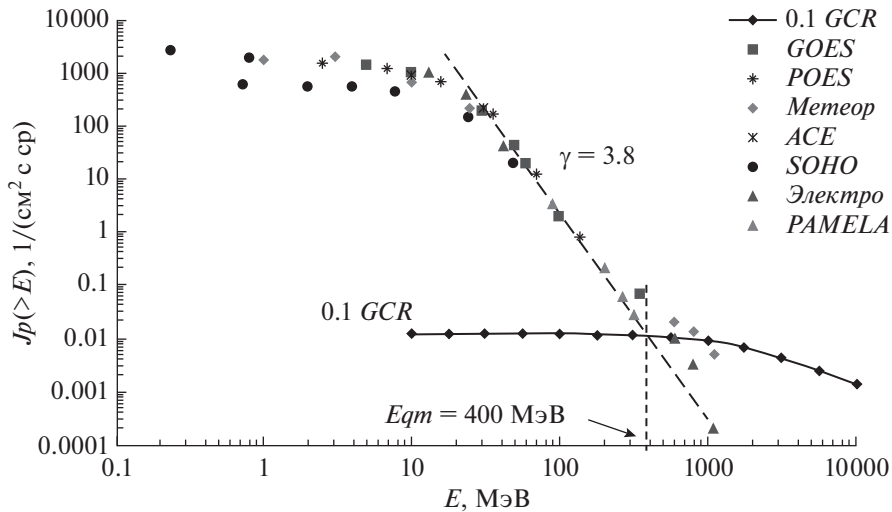


Рис. 2. Энергетический спектр интегральных потоков солнечных протонов в максимуме события 7.1.2014.

пересчитывались в интегральные. Если в событии выделено два-три максимума, то спектры строились для каждого максимума. Прямолинейный в логарифмическом масштабе участок спектра, в большинстве событий для  $E \sim \geq 10\text{--}30$  МэВ, аппроксимирован степенной функцией по энергии —  $J \sim E^{-\gamma}$ . На рисунках спектров также представлены уменьшенные в 10 раз потоки галактических космических лучей (ГКЛ, GCR) для периода максимума СА по ГОСТ 25645.150-90. Для каждого события рассчитана величина квазимаксимальной энергии ( $E_{qm}$ ), при которой наблюдается пересечение спектров солнечных протонов и 0.1 потока ГКЛ. Величина  $E_{qm}$  зависит от вида спектра в событии. Введенный параметр  $E_{qm}$  — это первое приближение к реальной максимальной энергии наблюдаемых потоков протонов в данном солнечном событии [15].

— В каталогах для каждого события приведены таблицы, содержащие экспериментальные данные по максимальным интегральным и дифференциальным потокам протонов, измеренных на всех имеющихся КА, во всех диапазонах энергий. Для 24 цикла перечень КА и диапазонов энергий представлен в табл. 1. Также каталоги СПС содержат таблицы с информацией об электромагнитных и других сопутствующих каждому событию явлениях (см., например, [7]).

— В раздел каждого события включен список публикаций, имеющих отношение к данному событию. Каталоги СПС включают в себя также общий список публикаций, в которых обсуждаются СПС данного цикла. К сожалению, список включает только публикации, вышедшие на момент завершения каталога. При создании списка публикаций были использованы ресурсы сайтов [https://ui.adsabs.harvard.edu/; https://scholar.google.

com/; http://europa.agu.org/?view=search; https://onlinelibrary.wiley.com/]. Используются ключевые слова: solar energetic particles + date; solar particle events + data.

— В серии каталогов СПС основная информация обо всех СПС в данном цикле представлена в сводной таблице. В таблице для каждого события содержатся характеристики потока частиц (дата, время начала и максимума, поток протонов с энергией  $>10$  МэВ, показатель спектра, квазимаксимальная энергия) и характеристики источника частиц — солнечной вспышки и/или КВМ (время, класс вспышки — рентгеновский и оптический, координаты, активная область).

## 2. ЭЛЕКТРОННАЯ ФОРМА КАТАЛОГА СПС 24 ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

В отличие от предшествующих каталогов СПС данной серии, для 24 цикла СА разработана электронная интерактивная форма каталога. На сайте Центра данных оперативного космического мониторинга (ЦДОКМ) НИИЯФ МГУ [http://smdc.sinp.msu.ru] в разделе “Космическая погода” создана страница каталогов СПС 20–24 циклов СА [http://swx.sinp.msu.ru/apps/sep\_events\_cat/index.php?gcm=1&lang=ru]. Пользователи могут получить PDF-файлы каталогов СПС 20–24 циклов, а также общую таблицу и список публикаций по всем СПС 24 цикла СА.

В интерактивной форме каталога СПС 24 цикла СА представление данных осуществляется в объектно-ориентированном формате JSON и доступ к данным производится на основе протокола REST API, что удобно с точки зрения разработки программ для анализа и отображения данных. Преимущество такого подхода заключается в от-

сутствии специальных программ для построения и извлечения данных из текстовых файлов и их преобразования в требуемую структуру.

Для каждого события из полного списка СПС с 2010 по 2017 г. (в 2008–2009 гг. и в 2018–2019 гг. СПС не наблюдались) создана своя страница, которая содержит легенду события, обзорный график (см., например, рис. 1) и временные профили потоков протонов по данным КА *ACE*, расположенного в межпланетной среде в точке *L1*, ИСЗ *GOES* и *Электро* (геостационарная орбита) и ИСЗ *Метеор* (низковысотная полярная орбита). Для каждого СПС пользователь может посмотреть и получить с сайта файлы в *doc*-формате с таблицами и энергетическими спектрами интегральных потоков солнечных протонов в максимуме события и временные профили потоков протонов по данным КА *SOHO* и *POES*. Реализована возможность сортировки и выбора СПС по заданным пользователем параметрам: дата, интенсивность, гелиокоординаты источника (долгота и широта), класс солнечной вспышки (рентгеновский и оптический), активная область, определенные параметры КВМ, GLE-события, величина показателя энергетического степенного спектра, квазимаксимальная энергия события.

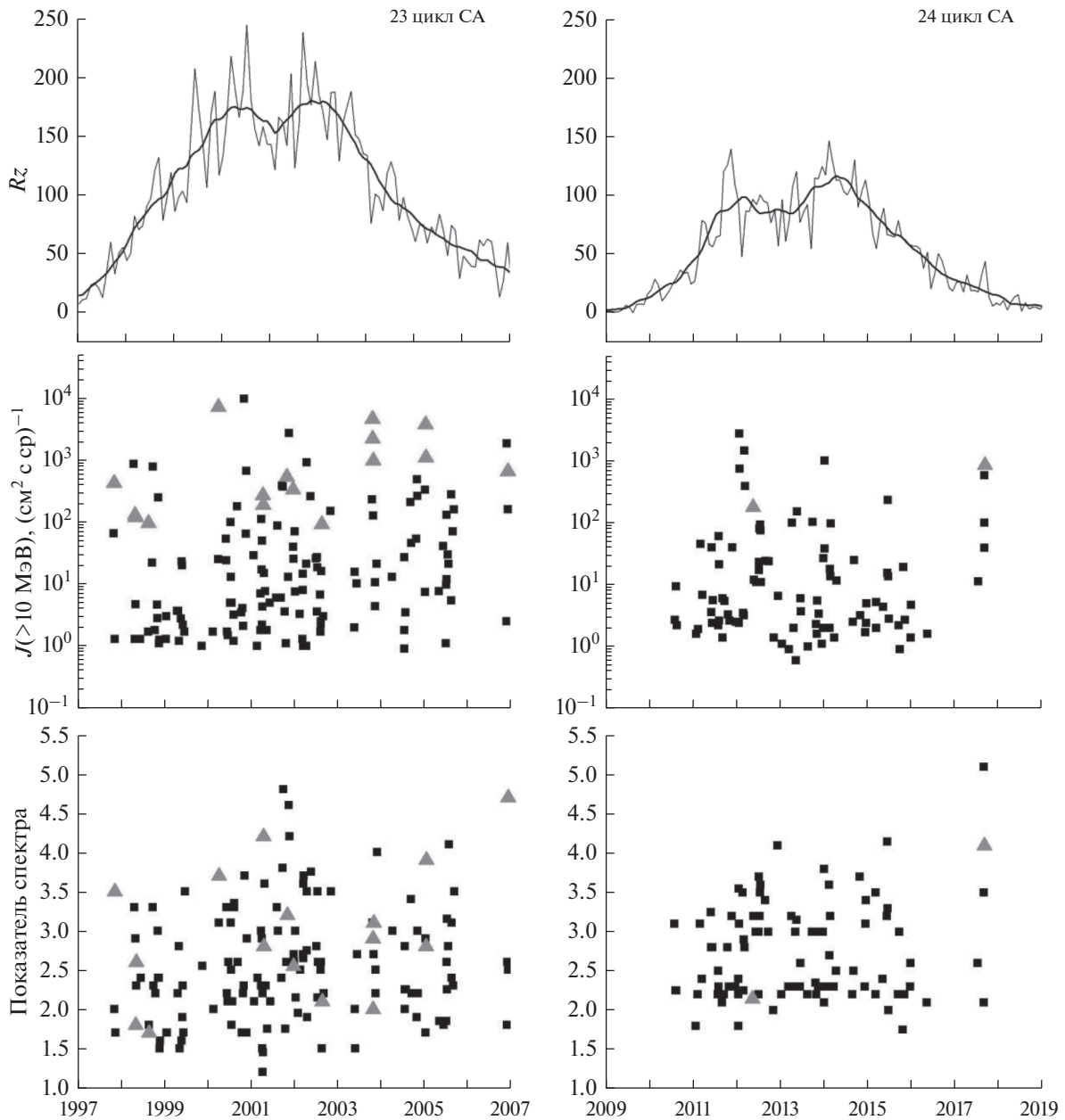
### 3. О НЕКОТОРЫХ СТАТИСТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЯХ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ 23 И 24 ЦИКЛОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Информация об основных характеристиках солнечных протонных событий, представленная в каталогах СПС, может быть использована для сравнительного исследования циклов СА. Анализ накопленных значений числа солнечных пятен, количества СПС с  $J(E > 10 \text{ МэВ}) \geq 1 \text{ pfu}$ , событий GLE, солнечных вспышек рентгеновского класса X и КВМ в 21–24 цикла СА показал, что наибольшие различия наблюдаются между 23 и 24 циклами [16]. 21 и 22 цикла СА относятся к эпохе повышенной солнечной активности, 23 цикл – к переходному периоду между эпохами, 24 цикл начинает эпоху пониженной солнечной активности [17]. Выберем для исследования 23 и 24 цикла СА. По числу солнечных пятен 24 цикл был примерно в 1.5 раза слабее 23 цикла (рис. 3,  $R_z$ : сглаженные числа солнечных пятен за месяц – толстая линия и реальные – тонкая). В 23 цикле в течение 10 лет (1997–2006 гг.) наблюдалось 146 СПС с  $J(E > 10 \text{ МэВ}) \geq 1 \text{ pfu}$  среди них 16 событий GLE, в 24 цикле в течение 8 лет (2010–2017 гг.) – 100 событий среди них только 2 GLE (на рис. 3 и на последующих рисунках GLE-события нанесены треугольниками). В 23 цикле СА GLE наблюдались примерно равномерно в течение цикла, в 24 цикле одно GLE – в максимуме цикла, одно – на поздней фазе спада. Нельзя вы-

делить закономерность в распределении GLE в течение цикла и при анализе также 21 и 22 циклов [16]. В этой работе также показано, что в 21–23 циклах количество событий с  $J(E > 10 \text{ МэВ})$  было примерно в ~9–12 раз больше, чем событий GLE, а в 24 цикле это соотношение составляло ~47. Сравнивая 23 и 24 цикла СА (рис. 3), можно видеть, что наиболее интенсивные СПС с  $E > 10 \text{ МэВ}$  зарегистрированы в максимуме циклов и на фазах спада. В 23 цикле событий с  $J(E > 10 \text{ МэВ}) > 10^2 \text{ pfu}$  было зарегистрировано мало, с  $J(E > 10 \text{ МэВ}) \sim 10^4 \text{ pfu}$  не было. В GLE-событиях интенсивность потока солнечных протонов с  $E > 10 \text{ МэВ}$  близка или превышает  $10^2 \text{ pfu}$ , также можно видеть небольшую тенденцию к ее увеличению с развитием циклов, но статистика слишком мала.

Одной из основных и важных для космической погоды характеристик СПС является энергетический спектр потоков протонов, который определяется, в основном, физическими процессами на Солнце, приводящими к ускорению заряженных частиц. Корональное распространение частиц, а также распространение в межпланетной среде могут оказать искажающее влияние на наблюдаемый около Земли спектр по сравнению со спектром генерации. На космическую погоду влияет именно наблюдаемый спектр солнечных протонов, который и оценивается в каталоге. Характер энергетического спектра определяет степень радиационного воздействия потоков солнечных частиц на космические аппараты и человека в космическом пространстве. Жизнь космонавтов и работоспособность космической техники напрямую зависят от величин потоков заряженных частиц, в частности, солнечных протонов, различных энергий (см., например, [18]).

Форма энергетического спектра солнечных протонов с различной степенью точности может быть описана несколькими способами. Например, в работе [19] было предложено описание спектра в виде экспоненциальной функции от жесткости. Анализ 145 СПС по данным КА *IMP-4,5* показал, что в диапазоне энергий 4–80 МэВ спектр может быть описан степенной функцией от энергии [20]. Также было отмечено, что спектры в области энергий 4–20 МэВ более жесткие, чем в области 20–80 МэВ. В настоящее время спектры солнечных протонов описываются и экспоненциальной, и степенной функциями, а также их комбинациями, как по энергии, так и по импульсу. В каталогах СПС 20–24 циклов СА прямолинейная часть интегрального спектра потоков протонов в максимуме (максимумах) события аппроксимируется степенной функцией по энергии с показателем  $\gamma$  (рис. 2). В данной статье используются показатели спектров потоков протонов только в первом максимуме события. Без притя-



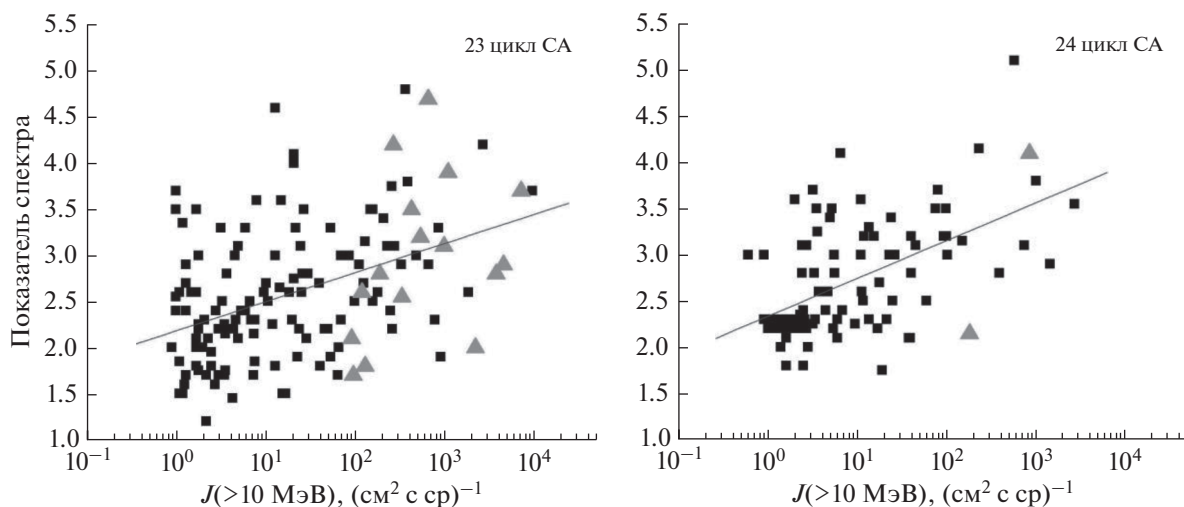
**Рис. 3.** Временные распределения числа солнечных пятен ( $Rz$ ), интенсивностей ( $J$ ) солнечных протонов с  $E > 10$  МэВ и показателей энергетических спектров в 23 и 24 циклах СА (см. текст).

заний на точное описание полного спектра такая аппроксимация дает представление о характере события и о примерном соотношении максимальных потоков частиц в разных диапазонах энергий. При энергии  $\sim 10$ – $30$  МэВ в спектре солнечных протонов часто наблюдается излом, при этом в области малых энергий спектр становится более жестким (см., например, рис. 2). По данным каталогов СПС 23 и 24 циклов СА разброс величин показателей спектров достаточно широк и не зависит от фазы солнечного цикла (рис. 3). В 24 цикле СА только 3 события имеют показатель ( $\gamma$ )  $< 2$  в диапазоне энергий примерно от 20 до

400 МэВ. Можно видеть, что при аппроксимации энергетического спектра солнечных протонов, принятой в каталогах СПС данной серии, величина показателя спектра GLE-событий также очень сильно варьирует. В работе [21] для GLE-событий проведена оценка спектра флюенсов протонов с энергией  $>30$  и  $>200$  МэВ. Показано, что мощные события имеют очень жесткий спектр. Аналогичный вывод для GLE-событий сделан в работе [22].

Распределение показателей спектров по шкале интенсивностей потоков протонов с  $E > 10$  МэВ демонстрирует широкий разброс (рис. 4). Тем не





**Рис. 4.** Распределение показателей спектров по шкале интенсивностей ( $J$ ) потоков солнечных протонов с  $E > 10$  МэВ в 23 и 24 циклах СА.

менее, можно говорить о некотором смягчении спектра при увеличении мощности события. Но, несмотря на большой разброс величин показателей спектров ( $\gamma$ ), вычисленные зависимости  $\gamma$  от  $\lg(J)$  очень близки для 23 и 24 циклов СА:  $\gamma = (2.2 \pm 0.1) + (0.31 \pm 0.06)\lg(J)$  и  $\gamma = (2.33 \pm 0.08) + (0.41 \pm 0.06)\lg(J)$ , соответственно (линии на рис. 4).

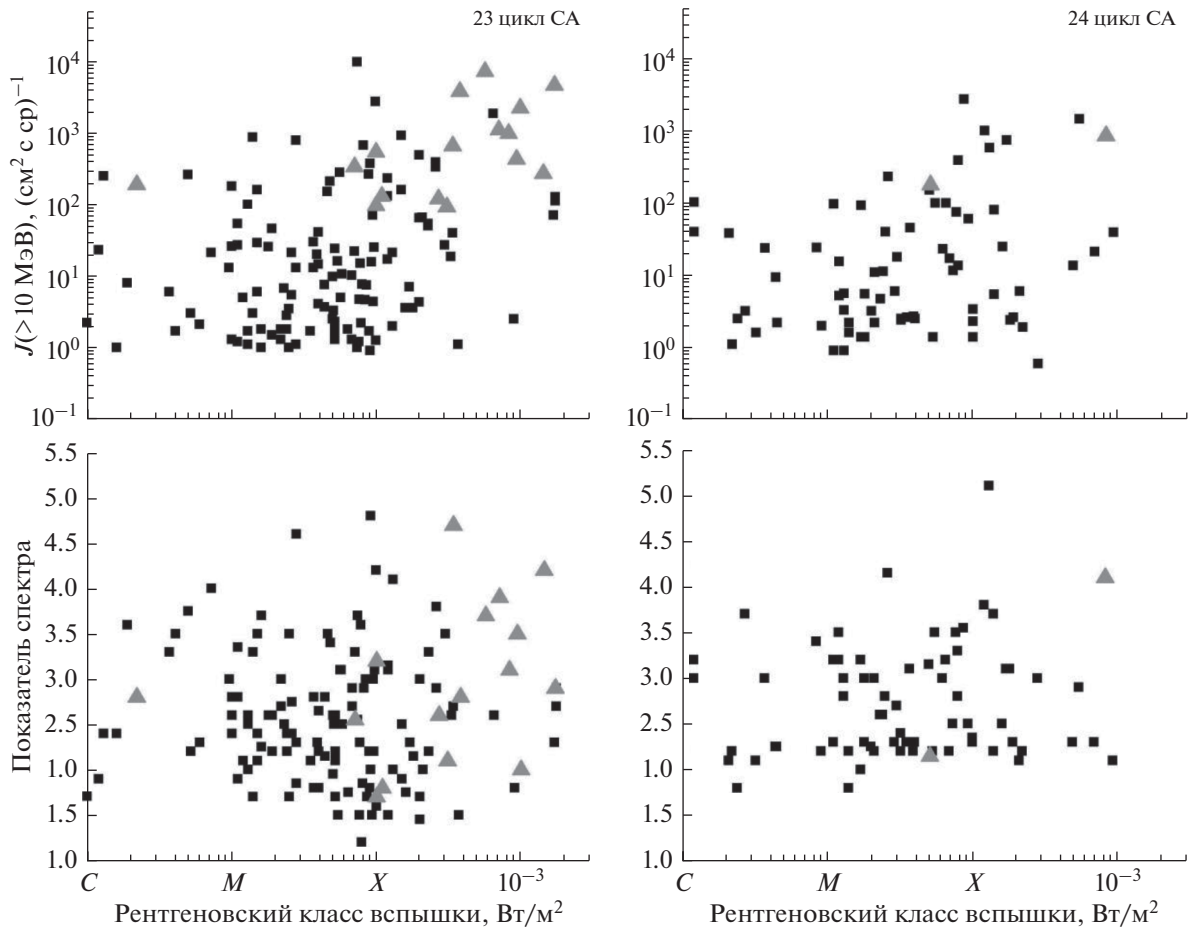
В 24 цикле СА события с большими потоками протонов с  $E > 10$  МэВ ассоциируются с солнечными вспышками рентгеновского класса X, и можно видеть небольшую тенденцию к росту потока при увеличении мощности вспышки, в 23 цикле такой зависимости не обнаруживается (рис. 5). GLE-события преимущественно ассоциируются со вспышками класса X. Только одно GLE-событие в 23 цикле СА связано со вспышкой класса C (18.IV.2001). В Каталоге отмечено, что данная вспышка с большой вероятностью является источником наблюдаемых потоков протонов, но вспышка произошла на западном лимбе Солнца (гелиокоординаты вспышки – S20W90). Можно предположить, что существует неточность в привязке события 18.IV.2001 к данной солнечной вспышке либо в оценке ее мощности.

В 23 и 24 циклах СА разброс величин показателей спектров потоков солнечных протонов очень широк, и никакой зависимости от рентгеновского класса вспышки не обнаруживается.

Основными механизмами распространения солнечных протонов в межпланетной среде являются диффузия и дрейф в межпланетном магнитном поле, а также конвекция вместе с радикально расширяющимися потоками солнечного ветра. В 23 и 24 циклах СА в окрестности Земли зарегистрировано большее число событий, а также наиболее мощные события от солнечных источни-

ков, находившихся на западных гелиодолготах (рис. 6). Полученный результат свидетельствует в пользу преимущественного распространения солнечных протонов с  $E > 10$  МэВ по межпланетному магнитному полю, по крайней мере, на фазе роста потока и в максимуме события. Приход, часто быстрый приход, к Земле солнечных частиц от источников на восточных гелиодолготах может быть интерпретирован в предположении сложной топологии межпланетного магнитного поля, существенно отличающейся от модели Паркера [23], или/и коронального распространения частиц (например, [24, 25]). Широкий гелиодолготный интервал распространения СПС также объясняют ускорением частиц на ударных волнах КВМ (например, [26]). Для распространения частиц по поверхности Солнца привлекают механизм взаимодействия с EUV волнами (например, [27]). Предполагается, что солнечные вспышки могут вызывать взрывные процессы в других активных областях, соединенных силовыми линиями крупномасштабных солнечных магнитных полей (например, [28]). Предлагаются механизмы коронального или уже в межпланетной среде переноса частиц поперек среднего магнитного поля (например, [29]). Для описания движения энергичных солнечных частиц в межпланетной среде часто используется диффузионное приближение, хорошо описывающее основные характеристики изотропных потоков.

Можно видеть (рис. 6), что источники всех GLE-событий находились на гелиодолготах западнее  $10^\circ$  E. СПС от источников на восточных гелиодолготах имеют более жесткий энергетический спектр. При регистрации одного СПС несколькими КА на разных гелиодолготах наблюда-



**Рис. 5.** Распределение интенсивностей ( $J$ ) потоков солнечных протонов с  $E > 10$  МэВ и показателей спектров по рентгеновским классам солнечных вспышек в 23 и 24 циклах СА.

емые показатели спектра различаются (например, [30]).

Распределения СПС 23 и 24 циклов СА по гелиоширотам (рис. 7) немного различаются. В 23 цикле источники СПС наблюдались и в почти приэкваториальных областях, как в северном, так и в южном полушариях. В 24 цикле видна четкая полоса (примерно  $\pm 5^\circ$  гелиошироты), где источников СПС не зарегистрировано. Источники GLE-событий находились и в северном, и в южном полушариях Солнца.

Динамику гелиоширотного распределения источников СПС по мере развития цикла СА можно видеть на рис. 8. В 23 цикле в приэкваториальных областях источники СПС наблюдались во второй половине цикла. Результаты исследования СПС 23 и 24 циклов СА на основе потоков частиц с  $E \sim 25$  МэВ показали, что в 23 цикле распределение источников СПС между северным и южным солнечными полушариями было асимметрично, тогда как в 24 цикле — симметрично [31]. Похожий вывод можно сделать для гелиоширотного рас-

пределения источников СПС и по потокам солнечных протонов с  $E > 10$  МэВ (рис. 8).

23 и 24 циклы солнечной активности различаются в наибольшей степени следующими параметрами: максимальное значение сглаженных за месяц солнечных пятен — 181.3 и 116.4; период, когда наблюдались СПС с  $J(E > 10 \text{ МэВ}) \geq 1 \text{ rfu}$ , — 10 лет (1997–2006 гг.) и 8 лет (2010–2017 гг.); СПС с  $J(E > 10 \text{ МэВ}) \geq 1 \text{ rfu}$  — 146 и 100; GLE — 16 и 2, соответственно. Приведенные выше распределения интенсивностей потоков солнечных протонов с  $E > 10$  МэВ в максимуме событий и показателей энергетического спектра интегральных потоков протонов при аппроксимации степенной функцией не имеют существенных различий в 23 и 24 циклах СА.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Космическая погода — широкое понятие, включающее в себя различные аспекты солнечно-земных связей и взаимодействий гелио- и геофизических процессов. СПС являются одной из

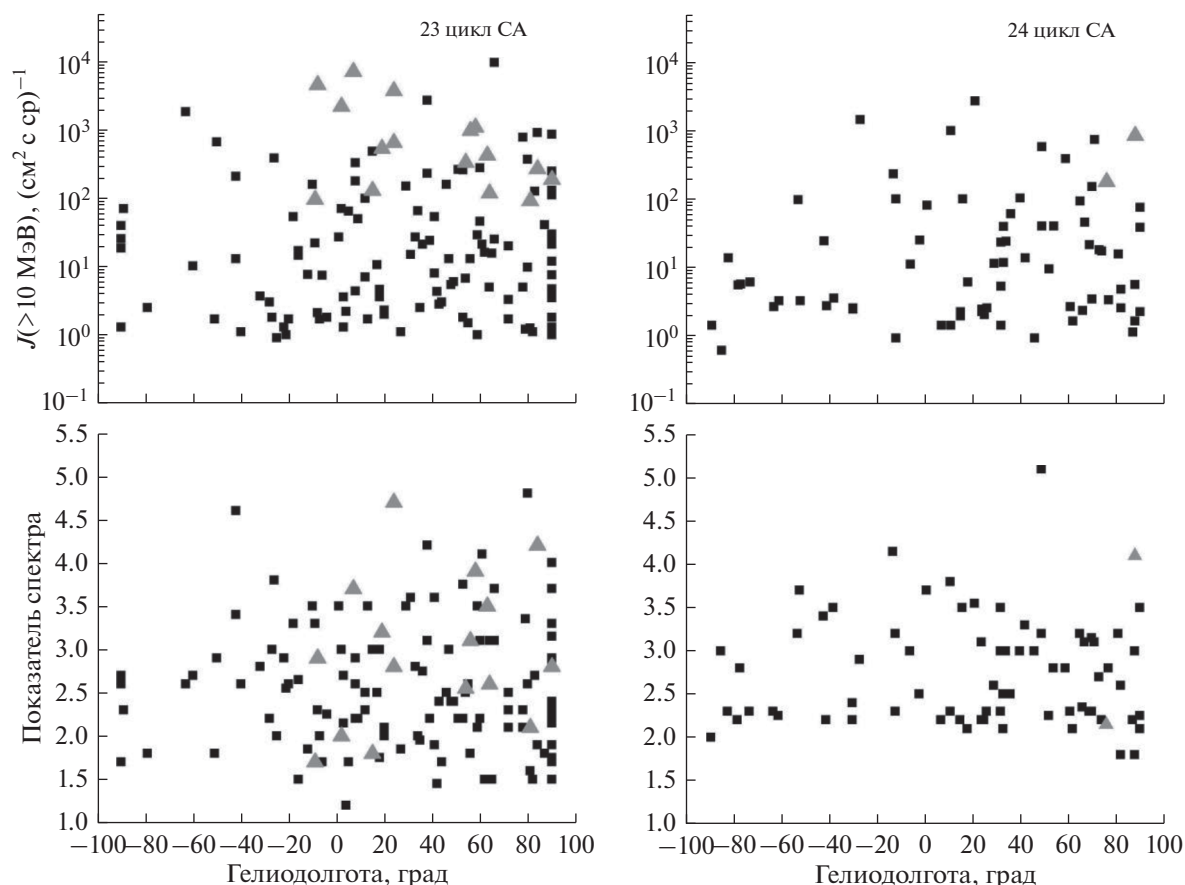


Рис. 6. Гелиодолготное распределение интенсивностей ( $J$ ) потоков солнечных протонов с  $E > 10$  МэВ и показателей спектров в 23 и 24 циклах СА.

составляющих, которые изучаются в рамках космической погоды. СПС очень разнообразны по своим характеристикам. Условия генерации частиц на Солнце и распространение в межпланетной среде влияют на временные профили, величины и энергетические спектры потоков солнечных протонов. Каталоги СПС предоставляют однородный ряд многолетних данных для статистического подхода к исследованию различных физических закономерностей.

Солнце — источник радиационной опасности. Одним из наиболее ярких проявлений солнечной активности являются солнечные вспышки, и как следствие — потоки солнечных энергичных частиц на космических аппаратах и, иногда, на наземных установках — GLE-события. Для космических миссий одной из основных угроз является радиационное поражение от солнечных энергичных заряженных частиц. На основе экспериментальных данных каталогов по потокам солнечных протонов и, что не менее важно, по энергетическим спектрам потоков, создаются эмпирические модели для расчета радиационных доз, которые могут угрожать жизни людей и функционирова-

нию космических аппаратов не только на околоземных орбитах, но и, например, во время марсианских миссий (см., например, [32]). На основе экспериментальных данных о СПС и о сопутствующих физических явлениях создаются модели радиации в космическом пространстве (например, [33, 34]).

На основе многолетних данных по динамике солнечных пятен и СПС могут быть созданы и создаются прогнозы солнечной активности. Для успешного прогноза геоэффективных активных явлений на Солнце и их последствий в околоземном космическом пространстве необходимо учитывать фазу развития и характеристики текущего цикла и эпоху солнечной активности [17, 35]. Число солнечных пятен — показатель развития солнечного цикла, но при использовании данных по динамике солнечных пятен возможен только вероятностный прогноз СПС (см, например, [36]). При этом, все равно, основой прогноза является однородный ряд многолетних данных по СПС. В работе [13] проведен сравнительный анализ характеристик потоков солнечных протонов и ассоциированных с ними рентгеновских вспы-

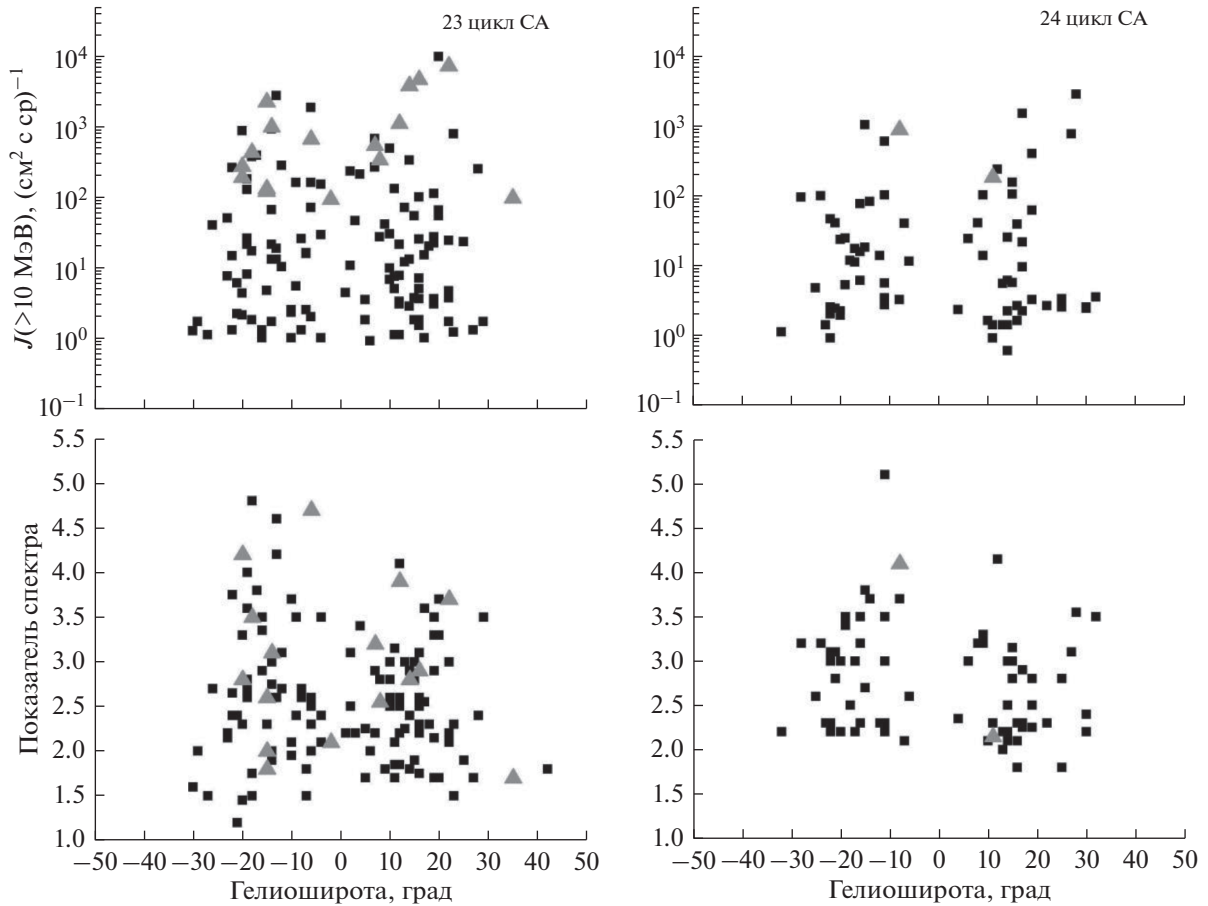


Рис. 7. Гелиоширотное распределение интенсивностей ( $J$ ) потоков солнечных протонов с  $E > 10$  МэВ и показателей спектров в 23 и 24 циклах СА.

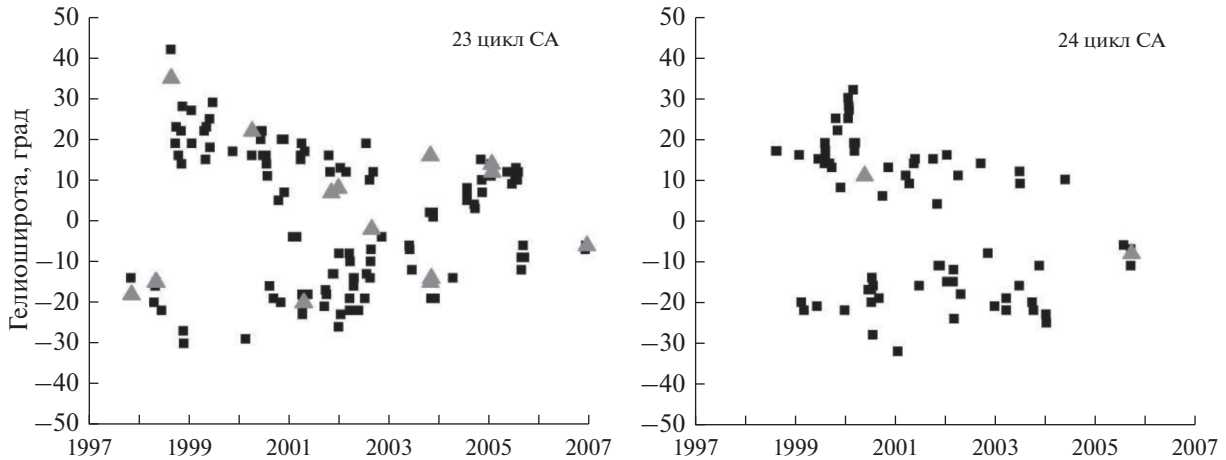


Рис. 8. Гелиоширотное распределение источников СПС в 23 и 24 циклах СА.

шек за 28 лет. Делается вывод о том, что выявленные связи могут быть использованы для создания прогностических моделей, позволяющих рассчитывать вероятность протонного события, его запаздывание и ожидаемый поток протонов на основе наблюдаемых характеристик рентгеновских вспышек.

Статистические закономерности и зависимости, полученные с использованием информации о СПС, позволяют делать выводы о физических процессах на Солнце и в межпланетной среде (см., например, [37]). Результаты статистического анализа данных Каталогов СПС 21–24 циклов СА показали, что более энергичные явления (GLE,

вспышки рентгеновского класса X, KBM со скоростью  $>1000$  км/с) сильнее деградируют с уменьшением солнечной активности [16]. Сделан вывод об источниках солнечных протонов и механизмах их ускорения: в генерации протонов низких энергий большую роль играют KBM, а драматическое уменьшение количества GLE, коррелирующее с изменением числа наиболее мощных вспышек класса X, свидетельствует о большей роли солнечных вспышек для возникновения GLE-событий. Этот вывод подтверждает полученные результаты также на основе статистического анализа, но только по 23 циклу SA, свидетельствующие о существенном вкладе KBM в генерацию солнечных частиц малых энергий [38].

По данным о СПС 19–24 циклов SA обнаружена существенная неравномерность в распределении источников событий по долготам Кэррингтона на Солнце: выявлен протяженный по долготе ( $\sim 100^\circ$ – $170^\circ$ ) интервал “пассивных” долгот [39]. Полученный результат интересен для физики солнечной активности, а также может быть полезен для планирования наиболее радиационно-безопасного периода, например, для полета на Луну.

Результаты исследования СПС, зарегистрированных несколькими КА в широком диапазоне гелиодолгот, показали, что максимальная интенсивность потока частиц регистрируется наблюдателем, находящимся на магнитной силовой линии от солнечной вспышки [14]. Время регистрации события по отношению к началу солнечной вспышки, а также время нарастания потока свидетельствуют о сложной зависимости от характеристик источника и механизмов ускорения и распространения частиц.

Во время СПС необходима оценка времени пребывания КА, в частности МКС, в области с большими потоками солнечных энергичных частиц, воздействующих на людей и технику. Для предсказания радиационной опасности необходимо исследование динамики границ проникновения солнечных протонов в магнитосферу Земли, которое возможно по данным низковысотных полярных спутников (см., например, [40]), представленных в каталогах СПС.

Кроме статистического подхода к исследованию факторов космической погоды, на основе данных каталогов СПС могут проводиться и конкретные исследования отдельных интересных событий. Представленный в каталогах СПС графический материал, в частности временные профили потоков солнечных протонов, дают возможность исследователям проводить быстрый сравнительный анализ событий и выбирать те особенности конкретных событий, которые могут быть инструментом для изучения других физических явлений. Примером могут служить результаты срав-

нительного анализа временных профилей потоков протонов СПС 7.II.2011 и 20.II.2014, представленных в каталоге 24 цикла SA, и вариаций компонент межпланетного магнитного поля, которые дали возможность сделать вывод об определяющей роли структуры межпланетного магнитного поля в формировании особенностей временных профилей потоков частиц СПС 20.II.2014 [41]. Полученные экспериментальные результаты подтвердили ранее высказанные предположения о том, что фундаментальной структурой в гелиосфере является магнитоплазменная трубка (см., например, [25, 42]).

Обнаруженные различия во временных профилях потоков солнечных протонов, измеренных в межпланетной среде и внутри магнитосферы Земли на фазе роста потоков солнечных протонов 20.I.2005, позволили провести диагностику структуры магнитосферы и условия проникновения солнечных протонов в магнитосферу Земли при северной ориентации межпланетного магнитного поля [43].

Перечисленные выше результаты по изучению физических процессов на Солнце, в гелиосфере и в магнитосфере на основе данных о СПС подтверждают полезность каталогов СПС как инструмента для исследования космической погоды.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Серия каталогов СПС 20–24 циклов SA [2–8] – оригинальный проект, не имеющий аналогов в мировой научной практике, так как (вместе с первым каталогом Z. Svestka и P. Simon [1]) охватывает огромный временной интервал (1955–2019 гг., т.е. практически 6 полных 11-летних циклов солнечной активности – с 19 по 24 циклы). Возможность определить закономерности процессов, типичные и экстремальные параметры явлений может предоставить только большой статистический материал, собранный в каталогах СПС. Каталоги СПС содержат однородный ряд многолетних экспериментальных данных – неоценимый научный материал для изучения и предсказания самых разнообразных факторов космической погоды, таких как: физические процессы на Солнце, динамика солнечной активности, структура и состояние межпланетной среды и магнитосферы Земли. Каталоги СПС являются необходимым и, пожалуй, единственным инструментом для планирования и обеспечения безопасности космических миссий, так как одной из основных угроз для них является радиационное поражение от солнечных энергичных заряженных частиц.

Мы благодарим всех исследователей, представляющих через Интернет свои данные о вспышках на Солнце (<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar->

flares/x-rays/goes/xrs/), о числах солнечных пятен (<http://www.sidc.be/silso/datafiles>), о потоках частиц (<http://goes.gsfc.nasa.gov/>, <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/poes/>, [http://www.srl.caltech.edu/ACE/CRIS\\_SIS/](http://www.srl.caltech.edu/ACE/CRIS_SIS/), <http://sohowww.nascom.nasa.gov/>, <http://www.ieap.uni-kiel.de/et/ag-heber/costep/>).

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 19-02-00264.

Конфликт интересов: Автор В.В. Калегаев является членом редколлегии журнала “Космические исследования”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Catalog of solar particle events 1955–1969 / Ed. Z. Svestka, P. Simon // Astrophysics and Space Science Library. 1975. V. 49. Holland: D. Reidel Publishing Company. 1975.
- Акиньян С.Т., Базилевская Г.А., Ишков В.Н. и др. Каталог солнечных протонных событий 1970–1979 гг. М.: ИЗМИРАН, 1983. <https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-P-002>
- Базилевская Г.А., Вашенюк Э.В., Ишков В.Н. и др. Каталог энергетических спектров солнечных протонных событий 1970–1979 гг. М.: ИЗМИРАН, 1986. <https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-P-003>
- Базилевская Г.А., Вашенюк Э.В., Ишков В.Н. и др. Солнечные протонные события Каталог 1980–1986 гг. Временные профили интенсивности и энергетические спектры протонов, синоптические карты и схемы группы пятен. М.: МЦД, 1990. <https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-P-004>
- Базилевская Г.А., Вашенюк Э.В., Ишков В.Н. и др. Солнечные протонные события Каталог 1980–1986 гг. Данные наблюдений частиц и электромагнитных излучений. М.: МЦД, 1990. <https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-P-005>
- Сладкова А.И., Базилевская Г.А., Ишков В.Н. и др. Каталог солнечных протонных событий 1987–1996 гг. М.: МГУ, 1998. <https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-P-006>
- Логачев Ю.И., Базилевская Г.А., Вашенюк Э.В. и др. Каталог солнечных протонных событий 23-го цикла солнечной активности (1996–2008 гг.). М.: МЦД, 2016. <https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-P-001-RU>
- Логачев Ю.И., Базилевская Г.А., Власова Н.А. и др. Каталог солнечных протонных событий 24-го цикла солнечной активности (2009–2019 гг.). М.: МЦД, 2022.
- Kurt V., Belov A., Mavromichalaki H., Gerontidou M. Statistical analysis of solar proton events // *Annales Geophysicae*. 2004. V. 22. P. 2255–2271. SRef-ID: 1432-0576/ag/2004-22-2255
- Vainio R., Valtonen E., Heber B. et al. The first SEP-Server event catalogue ~68-MeV solar proton events observed at 1 AU in 1996–2010 // *J. Space Weather Space Clim*. 2013. V. 3. P. A12. <https://doi.org/10.1051/swsc/2013030>
- Usoskin I.G., Ibragimov A., Shea M.A., Smart D.F. Database of Ground Level Enhancements (GLE) of high energy solar proton events // *Proceedings of science*. 2016. V. 236. <https://doi.org/10.22323/1.236.0054>
- Miteva R., Samwel S.W., Costa-Duarte M.V. The Wind/EPACT Proton Event Catalog (1996–2016) // *Solar Physics*. 2018. V. 293. P. A27. <https://doi.org/10.1007/s11207-018-1241-5>
- Белов А., Гарсия Х., Курт В., Мавромичалаки Е. Протонные события и рентгеновские вспышки за последние три цикла // *Космич. исслед.* 2005. Т. 43. № 3. С. 171–185.
- Paassilta M., Papaioannou A., Dresing N. et al. Catalogue of >55 MeV wide-longitude solar proton events observed by *SOHO*, *ACE*, and the *STEREOs* at ≈1 AU during 2009–2016 // *Solar Phys*. 2018. V. 293. P. A70. <https://doi.org/10.1007/s11207-018-1284-7>
- Логачев Ю.И., Базилевская Г.А., Дайбог Е.И. и др. 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/S0044002718030121>
- Базилевская Г.А., Дайбог Е.И., Логачев Ю.И. и др. Характерные особенности солнечных космических лучей в 21–24 циклах солнечной активности по данным каталогов солнечных протонных событий // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2021. Т. 61. № 1. С. 8–15. <https://doi.org/10.31857/S0016794021010028>
- Ишков В.Н. Космическая погода и особенности развития текущего 24-го цикла солнечной активности // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2018. Т. 50. № 8. С. 785–800. <https://doi.org/10.1134/S0016794018060056>
- Кузнецов С.Н., Ныммик Р.А., Панасюк М.И. и др. Регистрация и прогнозирование поглощенных доз радиации от потоков солнечных протонов на борту орбитальных станций // *Космич. исслед.* 2004. Т. 42. № 3. С. 211–218.
- Freier P., Webber W.R. Radiation Hazard in Space from Solar Particles // *Science*. 1963. V. 142. P. 1587–1592. <https://doi.org/10.1126/science.142.3599.1587>
- Van Hollebeke M.A.I., Ma Sung L.S., McDonald F.B. The variation of solar proton energy spectra and size distribution with heliolongitude // *Solar Phys*. 1975. V. 41. P. 189–223.
- Asvestari E., Willamo T., Gil A. et al. Analysis of Ground Level Enhancements (GLE): Extreme solar energetic particle events have hard spectra // *Advances in Space Research*. 2017. V. 60. № 4. P. 781–787. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.08.043>
- Базилевская Г.А., Свиржевская А.К., Сладкова А.И. Связь между солнечными протонными событиями и рентгеновскими всплесками разных баллов на солнце // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2004. Т. 44. № 4. С. 442–448.
- Паркер Е.Н. Динамические процессы в межпланетной среде. М.: МИР, 1965.
- Reinhard R., Wibberenz G. Propagation of Flare Protons in the Solar Atmosphere // *Solar Physics*. 1974.

- V. 36. № 2. P. 473–494.  
<https://doi.org/10.1007/BF00151216>
25. Любимов Г.П., Контор Н.Н., Переслгина Н.В., Игнатъев П.П. Анизотропия солнечных протонов и неоднородности межпланетной среды // Известия АН СССР. Серия физическая. 1976. Т. 40. № 3. С. 462–470.
26. Cliver E.W., Kahler S.W., Reames D.V. Coronal shocks and solar energetic proton events // *Astrophys. J.* 2004. V. 605. № 2. P. 902–910.
27. Klassen A., Aurass H., Mann G., Thompson B.J. Catalogue of the 1997 *SOHO–EIT* coronal transient waves and associated type II radio burst spectra // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 2000. V. 141. P. 357–369.  
<https://doi.org/10.1051/aas:2000125>
28. Wang H., Chae J., Yurchyshyn V., Yang G. et al. Inter-Active Region Connection of Sympathetic Flaring on 2000 February 17 // *Astrophysical J.* 2001. V. 559. P. 1171–1179.
29. Zhang M., Zhao L., Rassoul H.K. Stochastic propagation of solar energetic particles in coronal and interplanetary magnetic fields // *IOP Conf. Series: J. Physics: Conf. Series.* 2019. V. 1225. P. A012010.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1225/1/012010>
30. Reames D.V., Kahler S.W., Ng C.K. Spatial and temporal invariance in the spectra of gradual particles in gradual solar events // *Astrophysical J.* 1997. V. 491. P. 414–420.  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1086/304939/fulltext/36264.text.html>
31. Richardson I.G., von Rosenvinge T.T., Cane H.V. 25 MeV solar proton events in Cycle 24 and previous cycles // *Advances in Space Research.* 2017. V. 60. № 4. P. 755–767.  
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.07.035>
32. Guo J., Zeitlin C., Wimmer-Schweingruber R.F. et al. A generalized approach to model the spectra and radiation dose rate of solar particle events on the surface of Mars // *Astronomical J.* 2018. V. 155. № 1. P. A49.  
<https://doi.org/10.3847/1538-3881/aaa085>
33. Method of the solar energetic protons fluences and peak fluxes determination. ISO/TR 18147. Space environment (natural and artificial). 2014.
34. Jiggins P., Heynderickx D., Sandberg I. et al. Updated Model of the Solar Energetic Proton Environment in Space // *J. Space Weather Space Clim.* 2018. V. 8. P. A31.  
<https://doi.org/10.1051/swsc/2018010>
35. Ишков В.Н. Прогноз космической погоды: принципы построения и границы реализации (опыт трех циклов) // *Космич. исслед.* 2017. Т. 55. № 5. С. 391–398.  
<https://doi.org/10.7868/S0023420617060012>
36. Rao V.K., Ramagopal K., Reddy R.R., Sankarasubramanian K. Association of solar energetic particle (SEP) events with sunspot numbers // *International J. Engineering Science Invention (IJESI).* 2018. V. 7. № 3. P. 19–24. [http://www.ijesi.org/papers/Vol\(7\)i3/Version-1/D0703011924.pdf](http://www.ijesi.org/papers/Vol(7)i3/Version-1/D0703011924.pdf)
37. Paassilta M., Raukunen O., Vainio R. et al. Catalogue of 55–80 MeV solar proton events extending through solar cycles 23 and 24 // *J. Space Weather Space Clim.* 2017. V. 7. P. A14.  
<https://doi.org/10.1051/swsc/2017013>
38. Dierckx M., Tziotziou K., Dalla S. et al. Relationship between solar energetic particles and properties of flares and CMEs: statistical analysis of solar cycle 23 events // *Solar Phys.* 2015. V. 290. P. 841–874.  
<https://doi.org/10.1007/s11207-014-0641-4>
39. Podzolk M.V. Passive Carrington longitudes of solar cosmic ray sources in solar cycles 19–24 // *J. Physics: Conference Series.* 2019. V. 1181. № 1. P. A012016.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1181/1/012016>
40. Тверская Л.В. Диагностика магнитосферы по релятивистским электронам внешнего пояса и прониновению солнечных протонов (обзор) // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2011. Т. 51. № 1. С. 8–24.
41. Власова Н.А., Тулунов В.И., Калегаев В.В. Некоторые особенности солнечных протонных событий 7.III.2011 и 20.II.2014 // *Космич. исслед.* 2021. Т. 59. № 4. С. 296–305.  
<https://doi.org/10.31857/S0023420621040063>
42. 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>
43. Kalegaev V., Nazarkov I., Vlasova N., Melkova S. Magnetospheric access for solar protons during the January 2005 SEP event // *J. Space Weather and Space Climate.* 2018. V. 8. P. A55.  
<https://doi.org/10.1051/swsc/2018040>