

УДК 537.591.5

ПОТОКИ СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГИЧНЫХ ПРОТОНОВ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ 13–23 МАРТА 2023 ГОДА

© 2024 г. Н. А. Власова^{1, *}, Г. А. Базилевская², Е. А. Гинзбург³, Е. И. Дайбог¹,
В. В. Калегаяев^{1, 4}, К. Б. Капорцева^{1, 4}, Ю. И. Логачев¹, И. Н. Мягкова¹

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

²Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

³Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова, Москва, Россия

⁴Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: nav19iv@gmail.com

Поступила в редакцию 18.08.2023 г.

После доработки 04.10.2023 г.

Принята к публикации 04.10.2023 г.

Представлены результаты исследования потоков солнечных протонов с энергией больше 5 МэВ в околоземном космическом пространстве 13–23.III.2023. Особенности исследуемого периода являются отсутствие наблюдаемой солнечной вспышки, с которой можно ассоциировать начало события, нехарактерный временной профиль потоков протонов, а также большая длительность существования потоков солнечных протонов в околоземном пространстве. Предпринята попытка объяснить источники наблюдаемых вариаций потоков частиц и понять, что происходило на Солнце и в окружающем Землю пространстве. Источником солнечных протонов 13.III.2023 был взрывной процесс на обратной от Земли стороне Солнца, зарегистрированный как корональный выброс массы очень большой мощности. Причиной длительного и сложного временного профиля солнечных протонов был вклад процессов ускорения частиц на Солнце и в межпланетной среде, а также модуляция потоков частиц структурами межпланетного магнитного поля. Предложен возможный сценарий, объясняющий существование повышенных потоков солнечных частиц 15–23.III.2023: формирование гелиосферной структуры — замкнутой области-ловушки, образованной двумя межпланетными корональными выбросами массы и областями взаимодействия высокоскоростных и медленных потоков солнечного ветра. В работе использованы экспериментальные данные, полученные с космического аппарата *Solar Orbiter* и с космических аппаратов, расположенных вблизи точки *L1* системы Земля — Солнце (*ACE* и *DISCOVER*) и на геостационарной орбите (*GOES-16*).

DOI: 10.31857/S0023420624020045, EDN: kzjhop

ВВЕДЕНИЕ

Одним из проявлений солнечной активности является взрывной процесс в атмосфере Солнца, двумя сторонами которого являются вспышка и корональный выброс массы (КВМ). Долгое время только солнечные вспышки считались источником энергичных частиц [1], но по мере исследования КВМ стали появляться экспериментальные и теоретические доказательства ускорения солнечных частиц ударными волнами, являющимися неотъемлемой составляющей при зарождении и дальнейшем распространении КВМ [2]. Наиболее признанная точка зрения состоит в том, что солнечные энергичные частицы ускоряются и в области

солнечной вспышки, и на ударных волнах, ассоциированных с КВМ [3].

В области вспышки заряженные частицы могут ускоряться несколькими механизмами, главные из которых — ускорение при магнитном пересоединении, стохастическое ускорение и ускорение на ударных волнах [4, 5]. Ускорению частиц на ударных волнах, связанных с КВМ, посвящен обзор [6].

Модели, предполагающие возможность накопления частиц в короне и их диффузию, были предложены в работах [7–10]. Корональное распространение ускоренных частиц получило подтверждение из наблюдений в ранних

работах [11, 12] и многих других, вплоть до измерений на космическом аппарате (КА) *Parker Solar Probe*, находящемся 04.IV.2019 на расстоянии 0.17 а.е. от Солнца и зарегистрировавшем потоки энергичных частиц из активной области, расположенной на 80° восточнее области на Солнце, связанной с КА силовыми линиями магнитного поля [13]. В последние годы найдены доказательства ускорения частиц корональными ударными волнами и построены модели, учитывающие ускорение частиц в короне Солнца и в межпланетной среде, связанное с КВМ [14, 15]. В работе [16] описывается формирование большой магнитной полости, ограниченной токовыми слоями, в результате взаимодействия потоков солнечного ветра и/или потока солнечного ветра с гелиосферным токовым слоем. В магнитных полостях, в свою очередь, возникают динамические мелкомасштабные магнитные острова, в которых может происходить ускорение частиц.

Главным фактором, определяющим условия для распространения солнечных энергичных заряженных частиц в межпланетной среде, является межпланетное магнитное поле (ММП) [17]. В спокойном солнечном ветре энергичные частицы распространяются в основном вдоль силовых линий и демонстрируют гладкий временной профиль потоков частиц. Возмущения солнечного ветра, в том числе так называемые межпланетные КВМ (МКВМ), меняют структуру ММП, что отражается на временных профилях потоков солнечных энергичных частиц. Основные особенности временных профилей частиц, возникающие при распространении ударных волн в межпланетной среде, описаны в работе [18].

Результаты анализа наблюдаемых временных профилей потоков частиц, которые отличаются большим разнообразием, представляют ценный материал для понимания процессов, происходящих в межпланетной среде. Для исследования статистических закономерностей, выделения типичных и экстремальных характеристик создаются каталоги солнечных протонных событий (СПС), основным достоинством которых является многолетний однородный ряд экспериментальных данных [19]. Особенности же отдельного события отражают и конкретные параметры источника, и конкретные условия распространения в неоднородной и нестационарной межпланетной среде. Цель данной работы — объяснить наличие в околоземном пространстве потоков солнечных энергичных протонов в течение длительного периода 13–23.III.2023, а также

особенности их временных профилей на основе результатов сравнительного анализа экспериментальных данных по потокам частиц и измерений параметров солнечного ветра и ММП.

ИСТОЧНИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Исследование динамики потоков солнечных протонов 13–23.III.2023 выполнены на основе экспериментальных данных, полученных с КА, расположенных в межпланетном пространстве (КА *ACE* и *Solar Orbiter*) и в магнитосфере Земли (искусственный спутник Земли (ИСЗ) *GOES-16*). КА *ACE* расположен в точке либрации *L1* (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>). КА *Solar Orbiter* в исследуемый период был расположен на расстоянии 0.61 а.е. от Солнца, а область на Солнце, связанная с КА силовыми линиями магнитного поля при скорости солнечного ветра 400 км/с, находится примерно на 60° восточнее, чем соответствующая область для Земли (<https://solar-mach.github.io/>). В статье представлен рисунок по данным с КА *Solar Orbiter* с прибора EPT [20]. ИСЗ *GOES-16* — геостационарный спутник Земли. В работе использованы экспериментальные данные по потокам солнечных протонов с энергией >5 , >10 , >30 , >60 и >100 МэВ, полученные с прибора Solar and Galactic Proton Sensor (<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes-r.html>).

Экспериментальные данные о параметрах солнечного ветра и ММП получены с КА *DISCOVER*, расположенного в точке либрации *L1* (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>). Используются данные о параметрах КВМ, полученные с коронографа LASCO/C2 на КА *SOHO* (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/), а также результаты расчета времен прихода ударных волн КВМ в околоземное космическое пространство (<https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/CMEscoreboard/>). Информация по параметрам солнечных вспышек получена на сайте <https://www.solarmonitor.org/>.

Большинство рисунков данной статьи создано на сайте центра данных оперативного космического мониторинга (ЦДОКМ) НИИЯФ МГУ, который обеспечивает доступ к оперативным данным космических экспериментов и моделям оперативного прогнозирования явлений космической погоды. На сайте ЦДОКМ в разделе «Космическая погода» (<https://swx.sinp.msu.ru/>) собраны данные, необходимые для оценки и анализа радиационной обстановки не только в околоземном космическом пространстве, но и межпланетной среде. Там же представлены

электронные интерактивные версии каталогов СПС 24-го и 25-го циклов солнечной активности и ссылки на печатные варианты каталогов СПС 20-го – 24-го циклов солнечной активности (https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/index.php?gcm=1&lang=ru). Усовершенствованные графические приложения дают возможность проводить сравнительный анализ как экспериментальных данных, так и результатов моделирования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В период 13–23.III.2023 в гелиосфере наблюдались повышенные потоки энергичных солнечных протонов. На рис. 1 представлены временные профили потоков солнечных протонов с энергией ~ 6.649 МэВ по данным КА *Solar Orbiter* (а), с энергией >10 и >30 МэВ по данным КА *ACE* (б) и с энергиями >5 , >10 , >30 , >60 и >100 МэВ по данным ИСЗ *GOES-16* (в) 11–24.III.2023. Аналогичный набор энергетических каналов по данным ИСЗ *GOES-16* будет использован на всех последующих рисунках данной статьи. Можно видеть, что и на КА *Solar Orbiter* (рис. 1а), который расположен в исследуемый период на 0.61 а.е. и имеет Кэррингтоновскую долготу на 26.6° меньше, чем у Земли, и на КА *ACE* (рис. 1б), расположенном в точке *L1*, и на ИСЗ *GOES-16* (рис. 1в) на геостационарной орбите наблюдаются повышенный поток частиц в течение длительного периода, а также нехарактерный для СПС временной профиль потоков частиц. Возрастание потоков солнечных протонов по данным КА *ACE* и ИСЗ *GOES-16* начинается 13.III.2023 и обрывается 23.III.2023. В табл. 1 представлены параметры основных солнечных вспышек и КВМ в исследуемый период, которые будут использованы в данной работе. Все солнечные вспышки, внесенные в табл. 1, имели длительность существенно больше 10 мин, а в работе [21] показано, что в таких продолженных вспышках происходит стохастическое ускорение частиц. Для проведения подробного исследования особенностей динамики потоков солнечных протонов в точке *L1* и в околоземном космическом пространстве и поиска источников наблюдаемых вариаций период разделен на две части: 13–15.III.2023 и 15–23.III.2023 (рис. 1).

Рассмотрим динамику потоков солнечных протонов в околоземном пространстве 13–15.III.2023. Временные профили потоков частиц по данным ИСЗ *GOES-16* и некоторых важных для исследования параметров 12–15.III.2023

представлены на рис. 2. Начало возрастания потоков протонов с энергией >100 МэВ зарегистрировано в 04:30 UT 13.III.2023. Солнечных вспышек непосредственно перед возрастанием потоков частиц не наблюдалось (рис. 2а), но было зарегистрировано гало от КВМ на обратной стороне Солнца. КВМ классифицируется как редкое. Модель *NASA* (<https://blogs.nasa.gov/sunspot/2023/03/14/a-powerful-solar-eruption-on-far-side-of-sun-still-impacted-earth/>) показывает, что движение КВМ направлено от Земли. Изображения КВМ, полученные на КА *SOHO*, показали наличие ускоренных энергичных частиц, которые могли быть зарегистрированы на ИСЗ *GOES-16*. Можно предположить, что источником первых потоков энергичных частиц в околоземном пространстве 13.III.2023 был взрывной процесс на обратной к Земле стороне Солнца в 03:36 UT, КВМ от которого был зарегистрирован, а рентгеновского излучения от соответствующей ему вспышки обнаружено не было. Начало роста потоков протонов с энергией >100 МэВ по данным ИСЗ *GOES-16* зарегистрировано

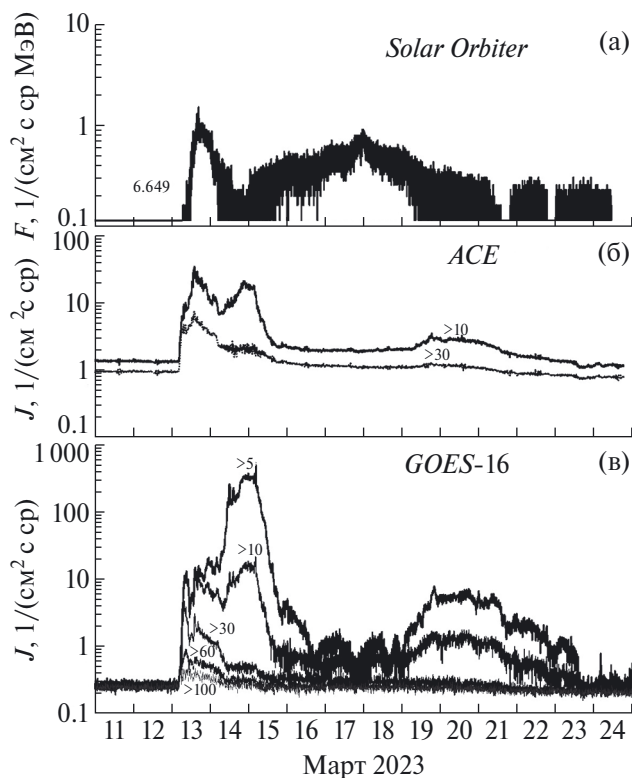


Рис. 1. Временные профили потоков солнечных протонов по данным КА *Solar Orbiter* (а), по данным КА *ACE* (б) и по данным ИСЗ *GOES-16* (в) 11–24.III.2023. Цифры рядом с кривыми — энергия солнечных протонов в МэВ.

Таблица 1. Параметры солнечных вспышек, КВМ и активных областей на Солнце и время прихода ударных волн КВМ к Земле

Солнечные вспышки				Корональные выбросы массы						Активная область	Время прихода ударных волн в околоземное космическое пространство, дата и UT ⁵
Дата	UT	Координаты	Балл	Координаты ¹	Дата	UT	V км/с ²	$\Delta\phi$, град. ³	PA , град. ⁴		
				S25W30	10.III.2023	13:36	750	302	214		14.III.2023 03:58
				N05W60	10.III.2023	17:24	461	211	263		
				S30W45	11.III.2023	16:36	684	360	Halo		
				S20E25	12.III.2023	19:12	649	360	Halo		15.III.2023 03:48
					13.III.2023	03:36	1699	360	Halo		
13.III.2023	09:50	N27E07	C3.1		13.III.2023	10:36	1015	360	Halo		15.III.2023 03:48
14.III.2023	05:52	S20W11	C3.0							13250	
14.III.2023	11:00	S24W30	C2.9							13254	
17.III.2023	06:12	S20E87	C6.4		17.III.2023	10:58	675	114	207	13256	
	06:45	S19E83	C6.4								
17.III.2023	12:58	S22W64	C7.3		17.III.2023	13:11	204	025	116	13254	
17.III.2023	15:04	S22W66	M1							13254	
18.III.2023	00:27	S19E72	C3.8							13256	
18.III.2023	07:10	S19E70	C9.4		18.III.2023	07:29	763	104	062	13256	
20.III.2023	00:57	S20E57	C4.1							13259	
20.III.2023	01:19	S21E37	M1.3		20.III.2023	02:41	424	086	214	13259	23.III.2023 09:10
20.III.2023	14:07	N18E18	C4.4		20.III.2023	14:42	727	360	Halo	13258	23.III.2023 09:10

Примечание. ¹ Гелиокоординаты КВМ определены по положению на Солнце диммингов (<https://www.sidc.be/solardemon/>).
² Медианное (начальное) значение скорости (V , км/с) радиального распространения КВМ при движении в поле зрения коронографа. ³ $\Delta\phi$ – угловой раcтвор (угловая ширина) КВМ вблизи Солнца. ⁴ PA – позиционный угол первого появления КВМ. ⁵ Время прихода ударной волны в околоземное космическое пространство (<https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/CMEscoreboard/>).

в ~04.30 UT, т.е. примерно через 1 ч после регистрации КВМ.

13.III.2023 в 09:50 UT произошла солнечная вспышка класса C3.1 (рис. 2а), имеющая гелиокоординаты N27E07. Длительность вспышки 1.5 ч. Вспышка сопровождалась КВМ со скоростью 1015 км/с, приход которого был зарегистрирован в околоземном пространстве 15.III.2023 (табл. 1). Это солнечное взрывное событие могло внести вклад в поток солнечных протонов. Солнечные вспышки рентгеновского класса C3 и C2.9 14.III.2023 (рис. 2а и табл. 1), расположенные на неоптимальных для прихода к Земле долготах, могли также внести, вероятно, небольшой вклад в наблюдаемый поток протонов (рис. 2б). Например, СПС 18.IX.2012 и 16.III.2016 в 24-м цикле солнечной активности ассоциировались с солнечными вспышками C3.7 и C2.2

соответственно [19]. Источниками довольно большого количества СПС 25-го цикла солнечной активности также считаются вспышки класса C (https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/index.php?gcm=1&lang=ru).

По данным сайта CME Scoreboard Общественно-координируемого центра моделирования (<https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/CMEscoreboard/>) к Земле пришли две ударные волны МКВМ: 14.III.2023 в 03:58 UT и 15.III.2023 в 03:48 UT (табл. 1). Источником МКВМ 14.III.2023 могли быть несколько КВМ зарегистрированных в коронографе 10–11.III.2023. Источником МКВМ 15.III.2023 могли быть два КВМ, зарегистрированные в коронографе 12.III.2023 (19:12 UT) и 13.III.2023 (10:36 UT). В обоих случаях, вероятно, произошло взаимодействие КВМ в гелиосфере, когда КВМ с большей скоростью догоняет

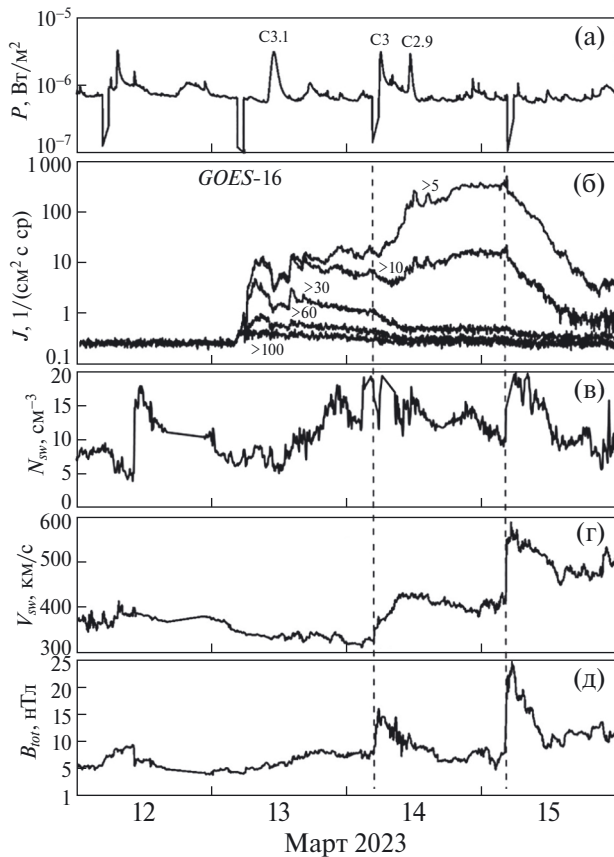


Рис. 2. Временные профили плотности потока рентгеновского излучения Солнца с длиной волны 0.1–0.8 нм и указанием балла вспышки (а) и потоков солнечных протонов с энергией >5, >10, >30, >60 и >100 МэВ по данным ИСЗ *GOES-16* (б), плотности (в) и скорости (г) солнечного ветра и модуля величины ММП (д) по данным КА *DISCOVER* 12–15.III.2023.

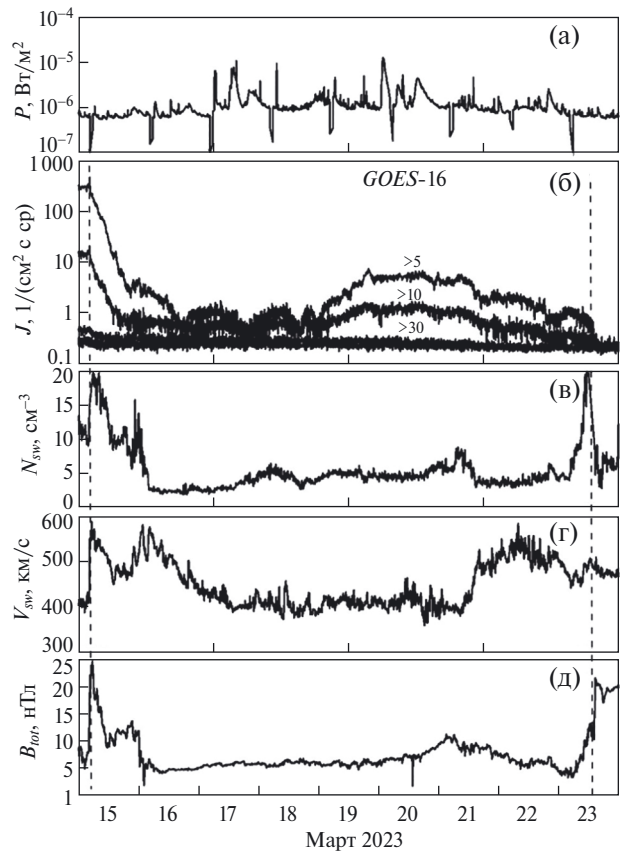


Рис. 3. Временные профили плотности потока рентгеновского излучения Солнца с длиной волны 0.1–0.8 нм (а) и потоков солнечных протонов по данным ИСЗ *GOES-16* (б), плотности (в) и солнечного ветра и скорости (г) модуля величины ММП (д) по данным КА *DISCOVER* 15–23.III.2023.

ранее ушедший КВМ. Моменты прихода ударных волн показаны вертикальными пунктирными линиями на рис. 2. На рис. 2в–д можно видеть, что в указанные моменты времени плотность и скорость солнечного ветра и величина магнитного поля терпят резкие изменения. Потоки протонов с энергиями >5 и >10 МэВ в интервале между двумя ударными волнами увеличиваются, в то время как поток более энергичных частиц (>30 МэВ) уменьшается до фонового уровня (рис. 2б). Изломы на профилях потоков частиц: с энергиями >5 и >10 МэВ в сторону увеличения, а с энергиями >30 и >60 МэВ в сторону уменьшения — могут означать приход области с сильным магнитным полем, препятствующим внешним частицам и принесшим частицы меньших энергий. Можно предположить, что наблюдаются ускоренные ударными волнами потоки протонов с энергией

<30 МэВ — энергичные штормовые частицы, примерно аналогично тому, что описано в работе [22].

Рассмотрим динамику потоков солнечных протонов в околоземном пространстве 15–23.III.2023. Временные профили потоков частиц по данным ИСЗ *GOES-16* и некоторых важных для исследования параметров представлены на рис. 3. Наблюдаются потоки протонов с энергиями <30 МэВ (рис. 3б). Вертикальными пунктирными линиями на рис. 3 показаны моменты прихода ударных волн (<https://kuaui.ccmc.gsfc.nasa.gov/CMEScoreboard/>). Максимум потоков протонов в начале 15.III.2023 мы считаем связанным с ударной волной, пришедшей в 03:48 UT. В период 15–23.III.2023 наблюдалось несколько солнечных вспышек (рис. 3а и табл. 1), которые могли внести вклад в поток солнечных протонов в межпланетной среде.

Можно видеть, что вариации плотности и скорости солнечного ветра (рис. 3в, г) и модуля величины ММП (рис. 3д) свидетельствуют о приходе к Земле ударных волн МКВМ: 15.III.2023 в 03:48 UT и 23.III.2023 в 09:10 UT (табл. 1). Нужно отметить, что МКВМ 15 и 23. III.2023 — это совокупный эффект двух КВМ, догоняющих друг друга: МКВМ 15. III.2023 — КВМ 12. III.2023 в 19:12 UT и 13. III.2023 в 10:36 UT; МКВМ 23. III.2023 — КВМ 20. III.2023 в 02:41 UT и в 14:42 UT (табл. 1). Величина ММП превышает 20 нТл, что более чем в 4 раза превышает величину среднего ММП на 1 а.е. Важно отметить, что потоки солнечных протонов уменьшаются до фонового уровня 23. III.2023 после прохождения фронта ударной волны и одновременного пересечения гелиосферного токового слоя.

ОБСУЖДЕНИЕ

Особенностью исследуемого периода повышенных потоков солнечных протонов 13–23. III.2023 является начало их возрастания 13. III.2023 без наблюдаемой солнечной вспышки, с которой это событие могло бы быть ассоциировано, но на обратной от Земли поверхности Солнца был зарегистрирован очень сильный КВМ. Скорость солнечного ветра во время прихода первых частиц составляла ~ 350 км/с (рис. 2г) — это медленный солнечный ветер, распространяющийся от Солнца радиально и дошедший до околоземного космического пространства за ~ 5 сут. Следовательно, источник силовых линий магнитного поля, вытянутых этим солнечным ветром, 13. III.2023 мог находиться на гелиодолготе $\sim W65$, и быстрый приход частиц от залимбовой вспышки является неожиданностью.

В работе [23] предложена модель долгого коронального распространения частиц, позволяющая объяснить быстрый приход частиц в широком (~ 30 – 50°) диапазоне долгот хаотичным движением частиц поперек магнитного поля, вследствие рассеяния на турбулентных неоднородностях в потоке плазмы. В работе [24] показано, что во время солнечных вспышек наблюдается усиление глобальных высокочастотных волн на Солнце, причем более интенсивное, чем от других источников. Мощные и регистрируемые в широком диапазоне долгот СПС часто ассоциируются с быстрыми и объемными КВМ, производящими корональные и межпланетные ударные волны [25]. В некоторых событиях наблюдаются распространяющиеся над солнечной

поверхностью глобальные волны, что дает возможность предполагать, что ударные волны могут охватывать всю поверхность Солнца, способствуя и долгому переносу энергичных частиц [26]. 13. III.2023 наблюдался КВМ редкой мощности. Таким образом, потоки солнечных протонов в этот день можно объяснить корональным распространением частиц от взрывного процесса на обратной от Земли стороне Солнца, зарегистрированного в 03:36 UT.

В статье о КВМ 13. III.2023 в 03:36 UT на сайте НАСА (<https://blogs.nasa.gov/sunspot/2023/03/14/a-powerful-solar-eruption-on-far-side-of-sun-still-impacted-earth/>) высказано предположение, что КВМ произошел в активной области 13234. 03. III.2023 в 17:39 UT в активной области 13234 произошла солнечная вспышка рентгеновского класса X2.1 с гелиокоординатами N21W76 (<https://www.solarmonitor.org/>). Через 9.4 дня активная область 13234 переместилась по долготе на $\sim 125^\circ$, т.е. находилась на расстоянии $\sim 69^\circ$ от восточного лимба Солнца на противоположной от Земли стороне Солнца. Таким образом, солнечные частицы должны были преодолеть по короне Солнца расстояние по долготе 134 и/или 226° .

Проведена оценка времени выхода солнечных частиц из Солнца в межпланетную среду. В событии 13. III.2023 частицы разных энергий достигли Земли в разное время, т.е. наблюдается прямой приход частиц от источника. Определены моменты первого прихода потоков солнечных частиц (указаны стрелками на рис. 4а–в). Предполагая, что они прошли одинаковое расстояние S , можем представить время прихода частиц как $t = S/v$, где v — скорость частицы. На рис. 4г зависимость представлена для протонов с энергией >10 , >60 и >100 МэВ по данным ИСЗ GOES-16 и для электронов с энергиями 0.038–0.053, 0.053–0.103, 0.103–0.175 и 0.175–0.315 МэВ по данным КА ACE. Для интегральных каналов взята пороговая энергия, для протонов с энергиями >10 и >60 МэВ учтен вклад каналов с большей энергией. Для удобства вычислений скорость (v) дана в долях скорости света (c), время — в часах 13. III.2023. Полученная зависимость может быть аппроксимирована линейной функцией $t = 0.2125c/v + 4.0489$ с коэффициентом достоверности $R^2 = 0.9418$. Экстраполяция полученной зависимости к $c/v = 0$ дает время выхода частиц из источника — 04:03 UT. Если предположить, что рождение частиц на Солнце произошло одновременно с зарегистрированным КВМ в 03:36 UT, то ≥ 30 мин длился процесс распространения частиц по короне Солнца.

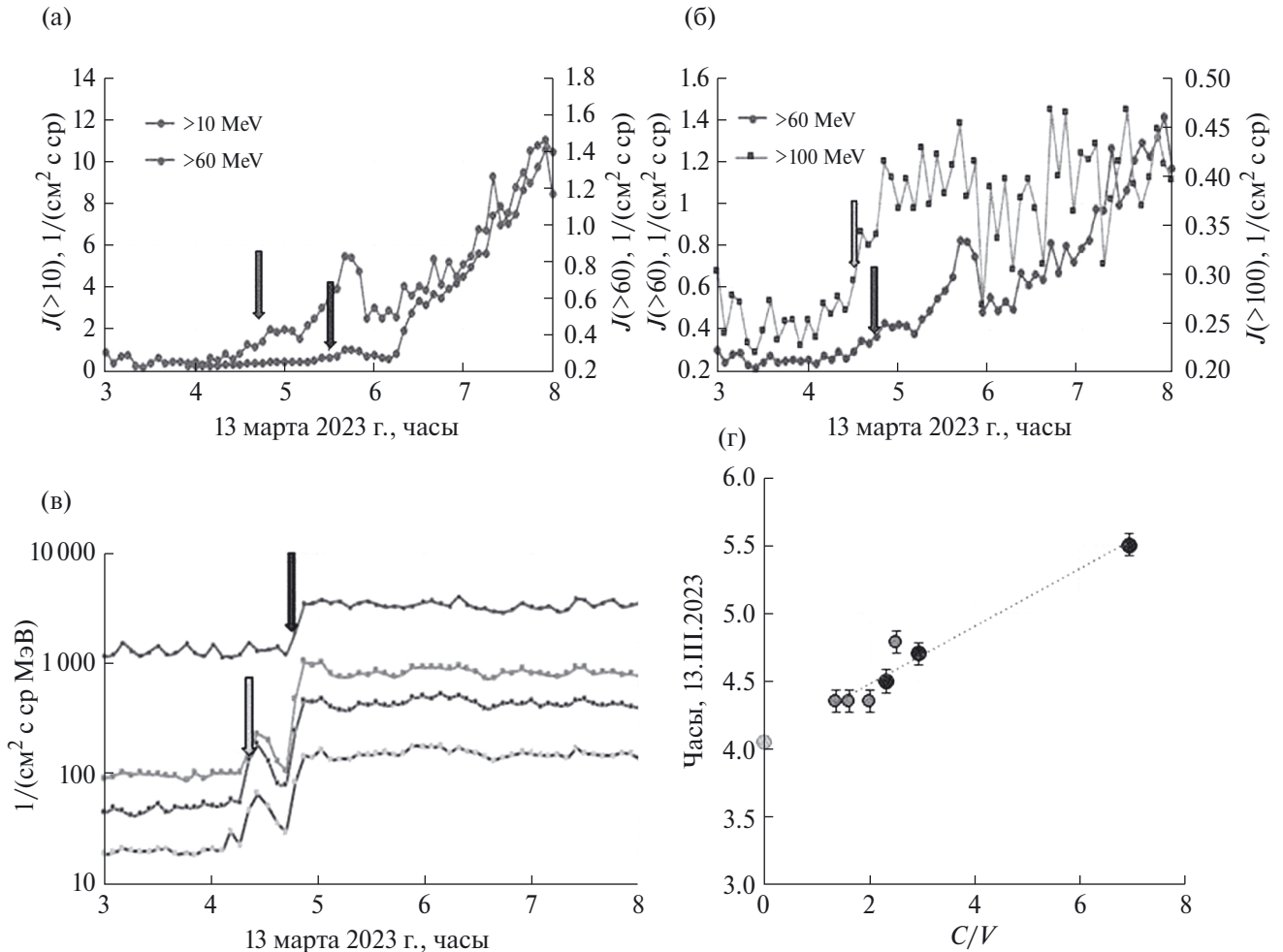


Рис. 4. Временные профили потоков протонов с энергией >10 и >60 МэВ (а), >60 и >100 МэВ (б) по данным ИСЗ GOES-16 и потоков электронов с энергиями 0.038–0.053, 0.053–0.103, 0.103–0.175 и 0.175–0.315 МэВ (в) по данным КА ACE 13.III.2023 (стрелками указаны моменты первого прихода частиц). Зависимость (г) времени прихода частиц в околоземное пространство от скорости частиц (протоны – темные значки, электроны – более светлые). Значок на оси Y – экстраполяция полученной зависимости для оценки момента выхода частиц из Солнца в межпланетную среду.

14–15.III.2023 наблюдается возрастание потоков протонов с энергией <30 МэВ. Возрастание потоков солнечных энергичных частиц вблизи фронта ударной волны, инициированной КВМ, интерпретируют как результат процесса ускорения частиц (быстрые штормовые частицы, англ. Energetic Storm Particles) ударной волной [27]. Временной профиль потоков протонов 14–15.III.2023 с увеличением потока протонов до и уменьшением потока после ударной волны, пришедшей к Земле 15.III.2023 в 03:48 UT, свидетельствует об ускорении частиц на фронте именно этой волны (рис. 2).

Начиная со второй половины 15.III.2023 потоки протонов с энергией ниже 30 МэВ не уменьшались вплоть до 23.III.2023 и даже

демонстрировали небольшое увеличение 18–22.III.2023, после чего произошел довольно быстрый спад потоков частиц. Мы наблюдали необычное явление, которое может быть объяснено только при некоторых предположениях.

Ранее в публикациях были предложены различные механизмы переноса энергичных частиц в структурах, сформировавшихся в гелиосфере. Эмпирическая “отражательная модель” предполагает захват и перенос частиц в полупрозрачных магнитных ловушках, образованных силовыми линиями ММП, вытянутыми от Солнца [9, 10]. В работе [28] существование вариаций потоков юпитерианских электронов вблизи Земли объясняется, в частности, пребыванием электронов в магнитных ловушках, имеющих форму

замкнутых магнитных структур, возникающих при взаимодействии разноскоростных потоков солнечного ветра (англ. Stream Interaction Region, SIR). Если эти структуры существуют длительное время, вращаясь вместе с Солнцем, то возникают коротирующие области взаимодействия (англ. Corotating Interaction Regions, CIR), которые могут оказывать влияние на динамику солнечных энергичных частиц [29, 31]. Существование в пространстве нескольких областей взаимодействия (SIR) или коротирующих областей взаимодействия (CIR), их взаимодействие друг с другом и с МКВМ приводят к образованию слившихся областей взаимодействия (англ. Merged Interaction Regions, MIR) [32], содержащих усиленное магнитное поле. Обычно такие области образуются на нескольких а.е. за орбитой Земли, но существуют свидетельства формирования слившихся областей взаимодействия и на расстояниях до 1 а.е. [33].

В работах [6, 18] подробно обсуждаются “резервуары” — обширные области пространства за распространяющимся ударным фронтом, содержащие захваченные частицы (рис. 5 в работе [6]). Резервуар располагается между ударным фронтом и Солнцем. Согласно [6], захват частиц в резервуар является результатом взаимодействия ускоренных на ударном фронте частиц с альфвеновской и/или гидромагнитной волновой активностью, сопровождающей ударный фронт. Внутри резервуара потоки частиц однородны, размеры резервуара могут составлять несколько астрономических единиц по радиусу и несколько десятков градусов по долготе. Границы резервуара могут частично совпадать с границами магнитного облака. Однако ни резервуар, ни магнитное облако не являются замкнутой ловушкой заряженных частиц. Фактически в работах [6, 18] они привлекаются для описания монотонного спада временного профиля потока частиц в постепенных событиях солнечных энергичных частиц, который другими авторами обычно приписывается их диффузионному распространению в пространстве. Для поддержания постоянных потоков частиц и образования замкнутой области на открытой границе резервуара должны были сформироваться области усиленного магнитного поля, препятствующие уходу частиц.

Используя приведенные выше возможные геиосферные структуры, можно предположить сценарий, объясняющий наблюдение повышенных потоков солнечных протонов с $E < 30$ МэВ 15–23.III.2023. Практическое постоянство потоков протонов на протяжении почти 8 сут.

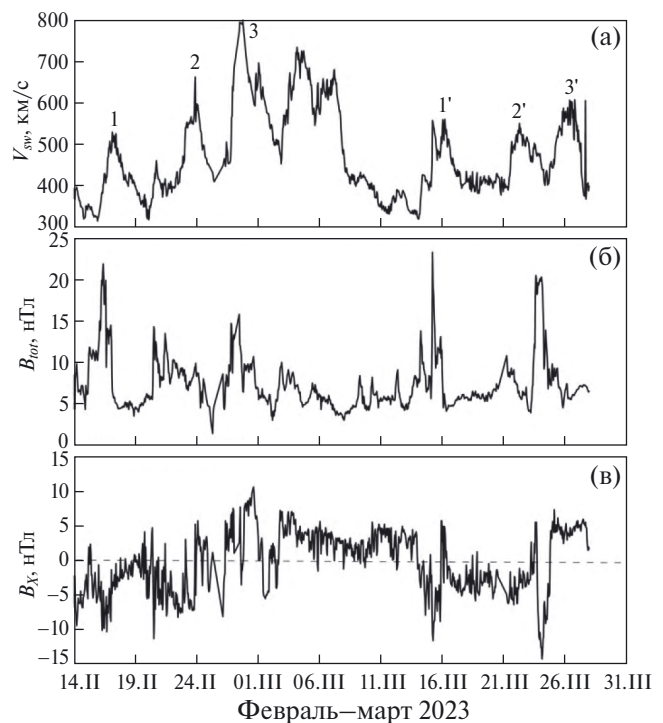


Рис. 5. Временные профили скорости солнечного ветра (а), модуля (б) и B_x -компоненты (в) ММП 14.II–27.III.2023. Цифры у кривых соответствуют номеру высокоскоростного потока.

означает, что область более 100° по долготе была равномерно населена протонами. В этой области и находилась Земля. Такая ситуация могла сложиться, если протоны были захвачены в замкнутой области-ловушке. Возникает вопрос, что создало границы этой области?

15–23.III.2023 зарегистрированы 2 прошедших мимо Земли МКВМ: 15 и 23.III.2023 (рис. 3). Каждый из МКВМ сформирован двумя КВМ, источниками которых являются взрывные процессы на восточной части диска Солнца, причем один в северной полусфере, а другой в южной (табл. 1). В результате могли сформироваться 2 мощных ударных фронта МКВМ с большими перепадами плотности и скорости солнечного ветра (рис. 3в, г) и очень сильными магнитными полями (рис. 3д). Экспериментальные данные, представленные на рис. 3, получены вблизи плоскости эклиптики, но можно предположить, что подобная картина наблюдается выше и ниже по широте, так как КВМ-источники на Солнце были разнесены по широтам. Можно предположить, что “резервуар” для

наблюдаемых 15–23.III.2023 солнечных протонов мог быть образован МКВМ, пришедшим к Земле 15.III.2023. Его ударный фронт являлся одной из границ (фронтальной границей) предполагаемой области-ловушки.

В феврале 2023 г. наблюдалось несколько высокоскоростных потоков солнечного ветра (рис. 5): скорость плазмы превышала 500 км/с 16–18 (№ 1), 23–25 (№ 2), 27–29.II.2023 (№ 3), причем в последнем случае скорость солнечного ветра достигла почти 800 км/с. В марте 2023 г. высокоскоростные потоки солнечного ветра 15–16 (№ 1'), 22–23 (№ 2') и 26–27.III.2023 (№ 3') были рекуррентными по отношению к соответствующим потокам в феврале 2023 г. На сайте ЦДОКМ (https://swx.sinp.msu.ru/models/solar_wind.php?gcm=1) можно видеть изображения корональных дыр на Солнце, ассоциированных с высокоскоростными потоками солнечного ветра. Каждый из высокоскоростных потоков сформировал область взаимодействия с предшествовавшим медленным солнечным ветром. Слившаяся область взаимодействия высокоскоростного потока № 1' и МКВМ, пришедшие к Земле 15.III.2023, могли сформировать западный край области-ловушки. Скорость солнечного ветра в потоке № 3 оставалась высокой в течение 13 дней (23.II–07.III.2023) и должна была сформироваться достаточно протяженная область взаимодействия потоков (SIR) с усиленным магнитным полем. Так как скорость потока 27–29.II.2023 (№ 3) была на ~200 км/с больше, чем потока 23–25.II.2023 (№ 2) (рис. 5а), то в результате за орбитой Земли могла образоваться и слившаяся область взаимодействия (MIR) также с усиленным магнитным полем. Мы полагаем, что существование в межпланетном пространстве 15–23.III.2023 нескольких областей взаимодействия с усиленным магнитным полем привело к образованию восточной границы области-ловушки, хотя это лишь качественная оценка. Поскольку эта область со временем расширялась, потоки частиц внутри нее должны были уменьшаться. Это не наблюдалось, а 19–23.III.2023 потоки частиц даже увеличились. Приходится допустить, что внутри области происходило ускорение протонов, источником которого были вспышки на Солнце (рис. 3а и табл. 1) и ударные волны за орбитой Земли, так как наблюдаемые вблизи Земли параметры межпланетной среды были в это время достаточно спокойными (рис. 3в–д).

Таким образом, по нашим предположениям, границами замкнутой области пространства

15–23.III.2023 с фронтальной стороны и частично с восточной был ударный фронт, который возник в результате взаимодействия КВМ 12 и 13.III.2023, а с восточной и западной сторон — области усиленного магнитного поля, образовавшиеся в результате взаимодействия быстрых и медленных потоков солнечного ветра. Ударный фронт МКВМ 23.III.2023 в 09:10 UT (рис. 3 и табл. 1) отрезал околоземное пространство от замкнутой области, и измеряемые потоки частиц вернулись к фоновому значению. В подтверждение представленному сценарию можно отметить, что 16–23.III.2023 Земля располагалась в одной части гелиосферы: 15 и 23.III.2023 наблюдались пересечения гелиосферного токового слоя (рис. 5в).

Следует подчеркнуть, что здесь представлено чисто качественное объяснение наблюдаемого временного профиля потоков протонов 15–23.III.2023, так как по имеющимся данным мы пока не можем восстановить реальную конфигурацию силовых линий ММП в это время. Для дальнейшего понимания происходивших процессов необходимо моделирование.

13–23.III.2023 в динамике потоков солнечных протонов наблюдается еще 2 интересных эффекта: 13.III.2023 в начале события существенно более сильные вариации потоков протонов, измеренные на геостационарной орбите, по сравнению с вариациями, одновременно измеренными в точке L1, и 16–19.III.2023 суточная модуляция потоков протонов с энергией >5 и >10 МэВ. Наблюдаемые особенности динамики потоков солнечных протонов связаны с процессами проникновения частиц в магнитосферу Земли. Это предмет дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование потоков солнечных протонов с энергией больше 5 МэВ в околоземном космическом пространстве 13–23.III.2023. Особенности исследуемого периода являются отсутствие наблюдаемой солнечной вспышки, с которой можно ассоциировать начало события, нехарактерный временной профиль потоков протонов, а также большая длительность существования потоков солнечных протонов в околоземном пространстве. Результаты сравнительного анализа динамики потоков солнечных протонов и вариаций параметров солнечного ветра и ММП дали возможность сделать следующие выводы:

- источником солнечных протонов 13.III.2023 был взрывной процесс на обратной от Земли

стороне Солнца, зарегистрированный как КВМ очень большой мощности, произошедший в 03:36 UT и не дошедший до околоземного космического пространства;

- приход солнечных протонов в околоземное пространство мог быть обусловлен распространением частиц в короне Солнца в течение ≥ 30 мин с последующим выходом в межпланетную среду на долготе $\sim W65$;

- причиной формирования 15.III.2023 максимума потоков частиц с энергией < 30 МэВ может быть ускорение частиц на ударной волне МКВМ, пришедшего к Земле в этот день в 03:48 UT (энергичные штормовые частицы);

- предложен возможный сценарий, объясняющий существование повышенных, почти постоянных потоков солнечных частиц 15–23.III.2023: образование гелиосферной замкнутой области-ловушки, сформированной двумя МКВМ и областями взаимодействия высокоскоростных и медленных потоков солнечного ветра.

Представленный сценарий является первым приближением к пониманию сложного комплекса событий на Солнце и в межпланетной среде в период 13–23.III.2023 г. В будущем этот период еще предстоит исследовать более детально.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны всем исследователям, представляющим через Интернет данные о потоках протонов, параметрах солнечного ветра и КВМ. Экспериментальные данные получены в Goddard Space Flight Center NASA: по солнечному ветру и ММП в OMNIWeb: High Resolution OMNI (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 КВМ получена в Coordinated Data Analysis Workshops (CDAW) (<https://cdaw.gsfc.nasa.gov>), SOHO LASCO CME CATALOG (<http://sidc.oma.be/cactus/catalog.php>). Времена прихода ударных волн КВМ получены на сайте (<https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/CMEscoreboard/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект «Ядерная и радиационная физика»).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meyer P., Parker E.N., Simson J.A. Solar Cosmic Rays of February, 1956 and Their Propagation through Interplanetary Space // *Physical Review*. 1956. V. 104. Iss. 3. P. 768–783. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.104.768>
2. Reames D.V. Solar energetic particles: A paradigm shift // *Reviews of Geophysics, Supplement*. 1995. P. 585–589. <https://doi.org/10.1029/95RG00188>
3. Bazilevskaya G.A. Once again about origin of the solar cosmic rays // *J. Physics: Conf. Series*. 2017. V. 798. Art. ID. 012034. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/798/1/012034>
4. Klein K.-L., Dalla S. Acceleration and Propagation of Solar Energetic Particles // *Space Science Reviews*. 2017. V. 212. P. 1107–1136. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0382-4>
5. Struminsky A.B., Grigorieva I. Yu., Logachev Yu.I., Sadovski A.M. Two Phases of Solar Flares and a Stochastic Mechanism for Acceleration of Electrons and Protons // *Astrophysics*. 2020. V. 63. P. 388–398. <https://doi.org/10.1007/s10511-020-09643-2>
6. Reames D.V. The two sources of solar energetic particles // *Space Science Reviews*. 2013. V. 175. P. 53–92. <https://doi.org/10.1007/s11214-013-9958-9>
7. Reid G.C. A diffusive model for the initial phase of a solar proton event // *J. Geophys. Res.* 1964. V. 69. Iss. 13. P. 2659–2667. <https://doi.org/10.1029/JZ069i013p02659>
8. Axford W.I. Anisotropic diffusion of solar cosmic rays // *Planetary and Space Science*. 1965. V. 13. Iss. 12. P. 1301–1309. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(65\)90063-2](https://doi.org/10.1016/0032-0633(65)90063-2)
9. Любимов Г.П. Отражательная модель движения СКЛ в петлевых ловушках // *Астрономический циркуляр АН СССР*. 1988. № 1531. С. 19–20.
10. Любимов Г.П., Григоренко Е.Е. Об отражательной модели солнечных космических лучей // *Косм. исслед.* 2007. Т. 45. № 1. С. 12–19.
11. Reinhard R., Wibberenz G. Propagation of Flare Protons in the Solar Atmosphere // *Solar Physics*. 1974. V. 36. Iss. 2. P. 473–494. <https://doi.org/10.1007/BF00151216>
12. Bazilevskaya G.A., Vashenyuk E.V. Some Features of Coronal and Interplanetary Propagation of Solar Cosmic Rays of High Energy // *Proc. 16th International Cosmic Ray Conference*. 1979. V. 5. Art.ID. 156.

13. 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. Art. ID. 35. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab5712>
14. Frassati F., Laurenza M., Bemporad A. et al. Acceleration of Solar Energetic Particles through CME-driven Shock and Streamer Interaction // *Astrophysical J.* 2022. V. 926. Iss. 2. P. 227–246. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac460e>
15. Zhang M., Cheng L., Zhang J. et al. A Data-driven, Physics-based Transport Model of Solar Energetic Particles Accelerated by Coronal Mass Ejection Shocks Propagating through the Solar Coronal and Heliospheric Magnetic Fields // *Astrophysical J. Supplement Series*. 2023. V. 266. Art. ID. 35. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/accb8e>
16. 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. Art. ID. 116. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab289a>
17. Паркер Е.Н. Динамические процессы в межпланетной среде. М.: МИР, 1965.
18. Reames D.V. How Do Shock Waves Define the Space-Time Structure of Gradual Solar Energetic Particle Events? // *Space Science Reviews*. 2023. V. 219. Art. ID. 14. <https://doi.org/10.1007/s11214-023-00959-x>
19. Логачев Ю.И., Базилевская Г.А., Власова Н.А. и др. Каталог солнечных протонных событий 24-го цикла солнечной активности (2009–2019 гг.). Москва: МЦД, 2022. <https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-008>
20. Rodríguez-Pacheco J., Wimmer-Schweingruber R.F., Mason G.M. et al. The Energetic Particle Detector. Energetic particle instrument suite for the Solar Orbiter mission // *Astronomy & Astrophysics*. 2020. V. 642. Art. ID. A7. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935287>
21. Григорьева И.Ю., Струминский А.Б. Формирование источника солнечных космических лучей в эруптивных вспышках X6.9 9 августа 2011 года и M5.1 17 мая 2012 года // *Астрономический журнал*. 2022. Т. 99. № 6. С. 486–495. <https://doi.org/10.31857/S0004629922060044>
22. Базилевская Г.А., Дайбог Е.И., Логачев Ю.И. Изолированные события солнечных космических лучей, обусловленные приходом быстрых штормовых частиц (ESP) // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2023. Т. 63. № 4. С. 503–510. <https://doi.org/10.31857/S0016794023600254>
23. Laitinen T., Kopp A., Eenberger F. et al. Solar energetic particle access to distant longitudes through turbulent field-line meandering // *Astronomy & Astrophysics*. 2016. V. 591. Art. ID. A18. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527801>
24. Kumar B., Mathur S., García R.A., Venkatakrishnan P. On the flare induced high-frequency global waves in the Sun // *Astrophysical J. Letters*. 2010. V. 711. P. L12–L18. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/711/1/L12>
25. Rodríguez-García L., Gómez-Herrero R., Zouganelis I. et al. The unusual widespread solar energetic particle event on 2013 August 19 – Solar origin and particle longitudinal distribution // *Astronomy & Astrophysics*. 2021. V. 653. A137. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039960>
26. Downs C., Warmuth A., Long D.M. et al. Validation of Global EUV Wave MHD Simulations and Observational Techniques // *Astrophysical J.* 2021. V. 911. P. 118–135. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abea78>
27. Bryant D.A., Cline T.L., Desai U.D., McDonald F.B. Explorer 12 observations of solar cosmic rays and energetic storm particles after the solar flare of September 28, 1961 // *J. Geophys. Res.* 1962. V. 67. Iss. 13. P. 4983–5000. <https://doi.org/10.1029/JZ067i013p04983>
28. 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>
29. 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>
30. Reames D.V. Solar Energetic Particles. A Modern Primer on Understanding Sources, Acceleration and Propagation. Part of the book series: Lecture Notes in Physics. V. 932. 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-50871-9>
31. Richardson I.G. Solar wind stream interaction regions throughout the heliosphere // *Living Reviews in Solar Physics*. 2018. V. 15. A1. <https://doi.org/10.1007/s41116-017-0011-z>
32. Burlaga L., Berdichevsky D., Gopalswamy N. et al. Merged Interaction Regions at 1 AU // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2003. V. 108. Iss. A12. Art. ID. 1425. <https://doi.org/10.1029/2003JA010088>
33. Wang Z., Guo J., Feng X. et al. The merging of two stream interaction regions within 1 au: the possible role of magnetic reconnection // *The Astrophysical J. Letters*. 2018. V. 869. Art. ID. L6. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaf398>