

УДК 523.6-523.9

ИЗОЛИРОВАННЫЕ СОБЫТИЯ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ПРИХОДОМ БЫСТРЫХ ШТОРМОВЫХ ЧАСТИЦ (ESP)

© 2023 г. Г. А. Базилевская^{1, *}, Е. И. Дайбог^{2, **}, Ю. И. Логачев^{2, ***}

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Москва, Россия

²Научно-исследовательский институт ядерной физики
им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Москва, Россия

*e-mail: bazilevskayaga@lebedev.ru

**e-mail: daibog@srd.sinp.msu.ru

***e-mail: logachev@srd.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 01.03.2023 г.

После доработки 13.03.2023 г.

Принята к публикации 28.03.2023 г.

По данным Каталогов солнечных протонных событий за 23-й и 24-й циклы солнечной активности выбраны события, не отождествленные с надежным источником частиц, но сопровождаемые межпланетными и геомагнитными возмущениями. Как правило, это события с малыми потоками протонов, зарегистрированных около Земли. Все выбранные события происходили во время прихода ударных волн на Землю и, таким образом, скорее всего были обусловлены приходом к Земле быстрых штормовых частиц. Показано, что источником этих событий могли быть вспышки, сопровождаемые корональными выбросами массы, произошедшие за десятки часов до начала возрастания потоков частиц на орбите Земли. Выбранные события обладают рядом особенностей. Только одно из них сопровождалось единственным ударным фронтом, тогда как во время остальных пришли 2 или 3 ударные волны. Временной профиль исследованных событий напоминал структуру, ограниченную двумя ударными фронтами. Таким образом, ударные волны, по-видимому, ускоряли и удерживали частицы в ограниченной области пространства.

DOI: 10.31857/S0016794023600254, EDN: ONBCTQ

1. ВВЕДЕНИЕ

Ударная волна, инициированная корональным выбросом массы (КВМ), и распространяющаяся от Солнца, может укорять заряженные частицы. Если ударный фронт пересекает точку наблюдения и процесс ускорения в этот момент продолжается, наблюдатель регистрирует возрастание потока частиц, которые называются быстрыми штормовыми частицами (ESP). Впервые ESP были зафиксированы на спутнике Эксплорер 12 во время солнечного протонного события 28 сентября 1961 г. через 2 дня после прихода первых протонов [Bryant et al., 1962]. Штормовые частицы часто наблюдаются на фоне спада временного профиля солнечных протонов; они ускоряются ударной волной, связанной с родительским КВМ, но при этом явно прослеживается другой механизм ускорения, чем для основной массы солнечных протонов — эффект виден только в области малых энергий, в редких случаях — более 10 МэВ. Доказательством ускорения на фронте ударной

волны служит рост потоков частиц вблизи фронта и, как правило, максимум потока частиц во время прохождения фронта через точку наблюдения. К настоящему времени явление ESP довольно хорошо изучено (из последних работ: [Giacalone, 2012; Ebert et al., 2016; Cohen et al., 2020; Chiappetta et al., 2021; Ameri et al., 2022]). Эти работы в основном были направлены на выяснение механизма ускорения частиц ударными волнами. Предполагается, что события ESP, длящиеся несколько часов, генерируются ускорением на квазипараллельных волнах диффузионным механизмом [Крымский, 1977; Bell, 1978], тогда как импульсные события ESP связаны с квазиперпендикулярными волнами и ускоряются дрейфовым механизмом [Decker, 1981]. Однако полное понимание происхождения ESP в настоящее время не достигнуто.

ESP нередко наблюдаются на спаде временного профиля солнечного протонного события (СПС) и хорошо представлены в Каталогах [Логачев

и др., 2016, 2022]. События ESP, происходящие вне связи с СПС, мы называем изолированными. Большинство таких событий возникает при взаимодействии высокоскоростных потоков солнечного ветра (SIR) (например, [Cohen et al., 2020; Ameri et al., 2022] и ссылки там) или с распространением в межпланетной среде быстрого КВМ, не связанного с СПС [Lario et al., 2005].

В данной работе мы рассматриваем несколько слабых протонных событий, которые могли быть изолированными событиями ESP, инициированными вспышками, которые произошли за десятки часов до наблюдаемого прихода ускоренных частиц. КВМ, сопровождающие эти вспышки, образовали ударные волны, ускорившие частицы, которые пришли к наблюдателю, тогда как поток частиц, связанных с вспышкой, был настолько мал, что не был распознан как СПС. Мы пытаемся найти для этих событий ESP наиболее вероятные источники на Солнце и сопоставить потоки частиц с возмущениями в межпланетной среде.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ESP

В Каталогах СПС за 23 и 24-й циклы солнечной активности [Логачев и др., 2016, 2022] были выбраны протонные события, не отождествленные с надежным источником частиц и сопровождавшиеся возмущениями межпланетного магнитного поля B , скорости солнечного ветра V_{sw} и магнитосферы Земли (Dst -индекс), характерными для прихода ударных волн. Было отобрано 9 событий, временные профили которых по 5-минутным данным спутников GOES [URL OMNI] показаны на рис. 1. Кроме потоков протонов с энергиями больше 5, 10, и 30 МэВ, на рис. 1 отмечены моменты прихода ударных волн согласно [URL shock] и время начала геомагнитной бури SC [URL SC], которое также свидетельствует о приходе фронта [Kamide and Maltsev, 2007]. В большинстве случаев события сопровождаются приходом нескольких ударных волн. На рис. 1 видно, что энергия протонов очень редко превышает 30 МэВ; интенсивность протонов с энергией выше 10 МэВ находится в пределах $0.5\text{--}5\text{ см}^{-2}\text{ с}^{-1}\text{ ср}^{-1}$. За исключением очень короткого события 11.08.2000 г., временные профили имеют характерную длительность порядка суток и почти всегда — резкие границы возрастания и спада потоков. Время максимума для протонов разных энергий совпадает, но иногда (событие 14.12.2012 г.) можно заметить, что потоки протонов больших энергий имеют меньшую протяженность, т.е. пространственная структура потока зависит от энергии.

Поиск источника ESP сводится к нахождению вспышки и КВМ, породившим ударную волну в межпланетном пространстве. Определение времени прихода ударной волны от КВМ осложняется

несколькими факторами [Barnard et al., 2022]. Поскольку КВМ наблюдаются в картинной плоскости, их истинная скорость распространения и позиционный угол не известны [Brueckner et al., 1995]. Серьезная проблема связана с распространением (замедлением или ускорением) КВМ в межпланетном пространстве, т.к. на них действуют окружающие структуры солнечного ветра и другие КВМ [Gopalswamy et al., 2000]. Эта проблема имеет не только фундаментальное, но и прикладное значение, связанное с прогнозом космической погоды. Многочисленные работы в этом направлении используют модельные представления (см. [Zhao and Dryer, 2014; Barnard et al., 2022; Капорцева и Шугай, 2021; Shi et al., 2021; Suresh et al., 2022] и ссылки там). Результаты этих работ свидетельствуют о больших неопределенностях в определении времени распространения КВМ между Солнцем и Землей. Например, в работе [Suresh et al., 2022] время распространения КВМ типа гало со скоростью $>400\text{ км/с}$ в направлении Земли составляло от 20 до 80 ч, а ошибки предсказанного времени прибытия КВМ на орбиту Земли доходили до $\pm 14\text{ ч}$. Учитывая неизбежные неопределенности, мы можем определить только наиболее правдоподобный источник изолированного события ESP с большей или меньшей степенью уверенности. Подробнее эти вопросы рассмотрены ниже.

В данной работе применялась следующая процедура для поиска предполагаемого источника события на Солнце: (1) рассматривались все вспышки баллов C, M и X [URL flares] и все КВМ [URL CME] за 4 сут до исследуемого события; (2) отбирались вспышки, сопровождавшиеся теми КВМ, которые могли достигнуть Земли к началу исследуемого события; (3) из оставшихся кандидатов отбирались наиболее мощные события на Солнце по баллу вспышки, скорости и угловому размеру КВМ. Дополнительным указанием на источник являлось наличие радиоизлучения II типа [URL TypeII].

Найденные источники событий ESP на Солнце приведены в табл. 1. В отдельной строке таблицы приводится дата и время прихода частиц. В следующих строках указаны характеристики предполагаемых источников данного ESP на Солнце: время, координаты и балл вспышки, наличие радиоизлучения II типа, время, скорость, позиционный угол PA и угловой растрвор W КВМ. Чтобы проиллюстрировать трудности, возникающие при определении источника ESP на Солнце, рассмотрим в качестве примеров несколько событий из таблицы.

В событии 26.06.1999 г., источники, на наш взгляд, определены достаточно уверенно. Событие началось ранним утром 26 июня и сопровождалось двумя внезапными началами геомагнит-

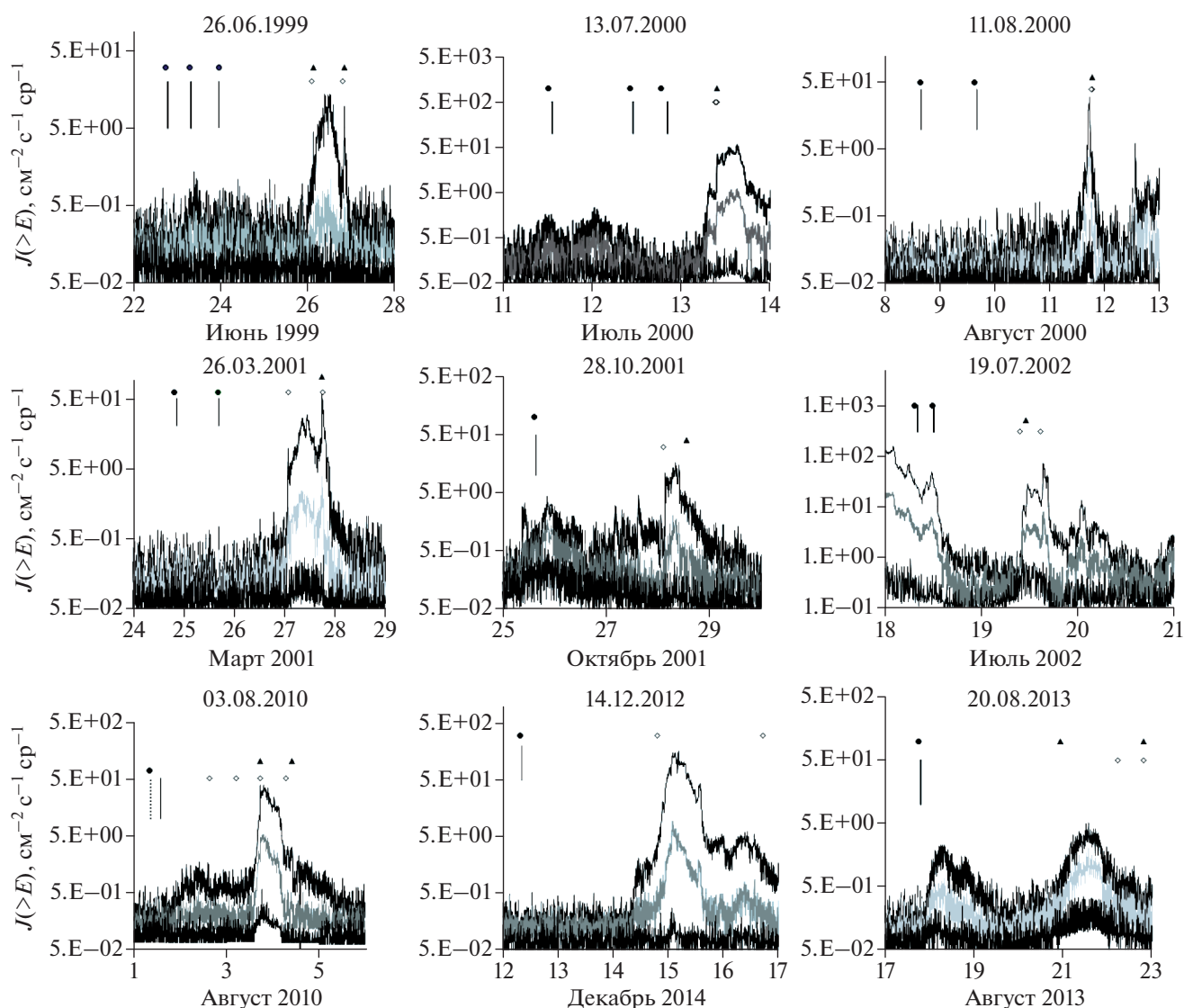


Рис. 1. Отобранные солнечные протонные события. Временные профили для протонов с энергией выше 5 МэВ (верхняя черная линия), 10 МэВ (серая линия) и 30 МэВ (нижняя черная линия) по данным спутника GOES [URL OMNI]. Отмечено время сопутствующих явлений: черные кружки — вспышки, вертикальные отрезки — KBM, треугольники — SC, ромбы — ударные волны.

ной бури SC [URL SC], свидетельствовавшими о приходе ударных волн, которые были подтверждены в базе [URL shock]. Вероятным источником протонов, согласно Логачев и др. [2016] могла быть западная вспышка 24 июня в 12:04 UT, C4.1, N29W13 за 1.5 сут до начала регистрации СПС. Такое запаздывание прихода частиц, ускоренных вблизи Солнца, от западной вспышки делает этот источник маловероятным. В течение 22–25 июня произошло 4 вспышки балла М, 33 вспышки балла С и 13 KBM. Только 2 вспышки класса М сопровождалась KBM, дошедшими до Земли: 22 июня в 17:37 UT, M1.7, N22E37 и 23 июня в 06:49 UT, N18E42. Обе вспышки сопровождалась радиоизлучением типа II и гало-KBM со скоростью

$V > 1000$ км/с. Они вполне могли дать ударные волны, пришедшие к Земле 26 июня в 03:25 UT и 20:16 UT по данным SC. Заметим, что момент прихода фронта волны по данным [URL Wind] примерно на 1 ч раньше, что соответствует времени распространения волны до Земли от точки Лагранжа L1, где находятся космические аппараты Wind, SOHO и ACE. В этом случае вспышки и KBM, произошедшие за ~3.5 сут до прихода ускоренных частиц на Землю, были источником события ESP 26 июня 1999 г. Западная вспышка 24 июня, предложенная в качестве источника в работе [Логачев и др., 2016], не сопровождалась радиоизлучением II типа и не дала заметного быстрого возрастания потока частиц, но спут-

Таблица 1. Вероятные источники ESP событий

Событие	Вспышка			КВМ				
Год, мес., день	часы, минуты	координаты	балл/Ри II тип	год, мес., день	часы, минуты	V, км/с	PA, град	W, град
1999 06 26								
1999 06 22	1737	N22 E37	M1.7/да	1999 06 22	1853	1133	halo	halo
1999 06 23	0649	N18E42	M5.7/да	1999 06 23	0731	1006	halo	halo
1999 06 24	1204	N29W13	C4.1	1999 06 24	1331	975	halo	halo
2000 07 13								
2000 07 11	1212	N18E27	X1/да	2000 07 11	1327	1078	halo	halo
2000 07 12	1018	N17E27	X1.9	2000 07 12	1106	1124	114	20
2000 07 12	1841	N16W64	M5.7/да	2000 07 12	2030	820	101	281
2000 08 11								
2000 08 08	1538	N21E31	C1.4	2000 08 08	1554	867	317	143
2000 08 09	1519	N11W11	C2.3	2000 08 09	1630	702	halo	halo
2001 03 26								
2001 03 24	1935	N15E22	M1.7	2001 03 24	2050	1185	halo	halo
2001 03 25	1625	N16E25	C 9.0	2001 03 25	1706	677	halo	halo
2001 10 28								
2001 10 25	1442	S16W21	X1.3/да	2001 10 25	1526	1092	halo	halo
2002 07 19								
2002 07 18	0724	N19W30	X 1.8/да	2002 07 18	0806	1099	halo	halo
2002 07 18	1151	N17E53	C2.7	2002 07 18	1206	794	154	277
2010 08 03								
2010 08 01	0755	N20E36	C3.2/да	2010 08 01	1342/0845	1309	halo	halo
2012 12 14								
Вероятный источник за лимбом Солнца								
2013 08 20								
2013 08 17	1816	S07W30	M3.3/да	2013 08 17	1912	1202	halo	halo
2013 08 17	1849	S07W30	M1.4					

Примечание. В событии 2010 08 03 указано: время наблюдения КВМ на высоте 10 Rs/время, экстраполированное к моменту наблюдения на коронографе LASCO/C2 [URL CME].

ствующий КВМ типа гало имел скорость $V = 975$ км/с и вполне мог создать фронт, достигший Земли вечером 26 июня в 20:16 UT, ограничивающий событие, как это видно на рис. 1.

Событие 11.08.2000 г. сопровождалось SC 11 августа в 18:46 UT [URL SC], которое фактически совпало с максимумом временного профиля события и приходом ударного фронта 11 августа в 18:49 UT. В Каталоге [Логачев и др., 2016] источником предполагалась залимбовая вспышка. С 7 по 11 августа наблюдалась только 1 вспышка балла M1.9 – 8 августа в 11:05 UT, N23E49, но она сопровождалась слабым КВМ, не дошедшим до

Земли. Наиболее вероятными кандидатами являются вспышка 8 августа в 15:38 UT, C1.4, N21E31, КВМ 8 августа в 15:54 UT, $V = 867$ км/с, позиционный угол $PA = 317^\circ$, угловой размах $W = 143^\circ$ и вспышка 9 августа в 15:19 UT, C2.5, N11W11, КВМ 9 августа в 16:30 UT, $V = 702$ км/с типа гало. Ни одна из этих вспышек не сопровождалась радиоизлучением II типа, и мы не можем выбрать кандидата, исходя из принятых нами критериев, но оба кандидата могли вызвать ESP 11 августа 2000 г. с запаздыванием порядка 50 и 75 ч соответственно. В Каталог Richardson and Cane (URL R&C возмущение 11.08.2000 г. включено как ICME (меж-

планетный KBM) источником которого на Солнце были эруптивные события 9 августа.

Событие 03.08.2010 г. сопровождалось двумя SC (3 августа в 17:40 UT и 4 августа 10:19 UT), подтвержденными приходом ударных волн [URL shock]. В качестве источника в Каталоге [Логачев и др., 2016] указано исчезновение волокна. Событие произошло на фоне низкой вспышечной активности — с 30 июля по 2 августа произошло 14 вспышек балла В и только 1 вспышка балла C3.2 — 1 августа в 07:55 UT, N20E36, которая сопровождалась радиоизлучением II типа. Этой вспышке нельзя напрямую сопоставить KBM из-за пропусков в наблюдениях LASCO [URL shock]. Ближайший KBM, типа гало, $V = 1309$ км/с, наблюдавшийся в 13:42 UT уже на высоте $>10 R_s$, может быть правдоподобно экстраполирован к моменту выхода 08:45 UT, что и сделано в [URL R&C]. Запаздывание первой ударной волны относительно источника ~ 57 ч. Происхождение второй ударной волны не известно.

Источник события 14.12.2012 г. в Каталоге [Логачев и др., 2022] не был отождествлен. В начале и в конце события были зафиксированы ударные волны (рис. 1). С 10 по 13 декабря на Солнце было зарегистрировано 19 вспышек, из них только 3 балла С, остальные балла В. Ни одна из них не сопровождалась радиоизлучением II типа. Вспышка 10 декабря C5.5 в 05:49 UT, N18E00 сопровождалась KBM, который не дошел до Земли. Вспышки 12 декабря C5.7 в 07:22 UT, N11W16 и 13 декабря C1.2 в 19:11 UT, N17W21 сопровождались KBM со скоростью соответственно 228 км/с и 177 км/с, что явно недостаточно для образования ударной волны, хотя во время движения в короне они демонстрировали ускорение [URL shock]. Вероятно, источник этого события ESP находился за лимбом Солнца.

Событие 14.12.2012 г. — единственное среди отобранных, для которого мы не находим правдоподобного источника. Но и для других событий мы часто не можем выбрать источник однозначно. Кроме того, 7 событий ESP сопровождались двумя или более ударными волнами. В результате в таблицу включено 16 вспышек и 15 KBM, которые могли быть источниками ударных волн, ускоривших ESP. Среди вспышек 9 было восточных и 7 западных, 4 события — балла Х, 6 — балла М и 6 — балла С. Среди KBM 9 имели скорость выше 1000 км/с, остальные — выше 600 км/с. Из 15 KBM 11 были типа гало.

Запаздывание прихода ударного фронта относительно времени выхода вероятного KBM в исследованных нами событиях было от 1 до 4 сут, что является типичным для событий ESP и подтверждает тот факт, что протоны в этих событиях ускорены ударными волнами.

3. СОБЫТИЯ ESP И ВОЗМУЩЕНИЯ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ

Мы сопоставили временные профили потоков протонов с одновременными значениями индукции межпланетного магнитного поля B и скорости солнечного ветра V_{sw} [URL OMNI]. На рис. 2, показано это сопоставление для некоторых событий. Верхние панели представляют потоки протонов, а нижние — временной ход B и V_{sw} . Поведение межпланетных параметров во время событий ESP демонстрирует большое разнообразие, но в первом приближении результаты можно разделить на несколько групп.

Только одно событие 11.08.2000 г. (рис. 2а) соответствует простым представлениям об ускорении частиц на фронте ударной волны, т.к. имеет максимум вблизи прохождения ударного фронта. Однако спад после максимума слишком крутой и, возможно, это связано с тем, что согласно [URL IKI], в этот день Земля вошла в магнитное облако.

В ряде случаев во время события ESP параметры межпланетной среды B и V_{sw} демонстрируют скачки, характерные для прихода ударного фронта. В событиях 25.06.1999 г., 26.03.2001 г., 19.07.2002 г. и 14.12.2012 г. наблюдался приход двух ударных волн, вторая из которых имела большую скорость, чем первая, что хорошо видно в резких возрастаниях V_{sw} на нижней панели события 26.03.2001 г. (рис. 2б). В этих случаях, по-видимому, имеет место ускорение между двумя фронтами. В событиях 25.06.1999 г. и 26.03.2001 г. вторая волна, кроме того, дает второй узкий максимум в потоке протонов.

В событиях 03.08.2010 г. (рис. 2в) и 20.08.2013 г. вторая волна в параметрах солнечного ветра была менее выражена, а в событиях 28.10.2001 г. и 14.12.2013 г. второй фронт трудно различить, но в базах [URL shock] ударные волны были зафиксированы, и, как видно на рис. 1, потоки протонов распространялись между двумя фронтами.

В событии 13.07.2000 г. (рис. 2г) был зарегистрирован приход только одного фронта, подтвержденного SC, в начале возрастания потока протонов. В конце события нет явных признаков фронта в параметрах B и V_{sw} , и нет указания на приход фронта в базе [URL shock]. Тем не менее, форма временного профиля потоков протонов свидетельствует о наличии межпланетных структур, ограничивающих потоки.

Подводя итог, можно утверждать, что временные профили потоков протонов всех исследованных событий ESP были заключены в ограниченных структурах, имевших вид струй. Как правило, передняя и задняя границы этих структур были образованы ударными фронтами, которые регистрировались на Земле в виде межпланетных ударных и/или SC. Фронты ударных волн не всегда четко прослеживаются в одновременно на-

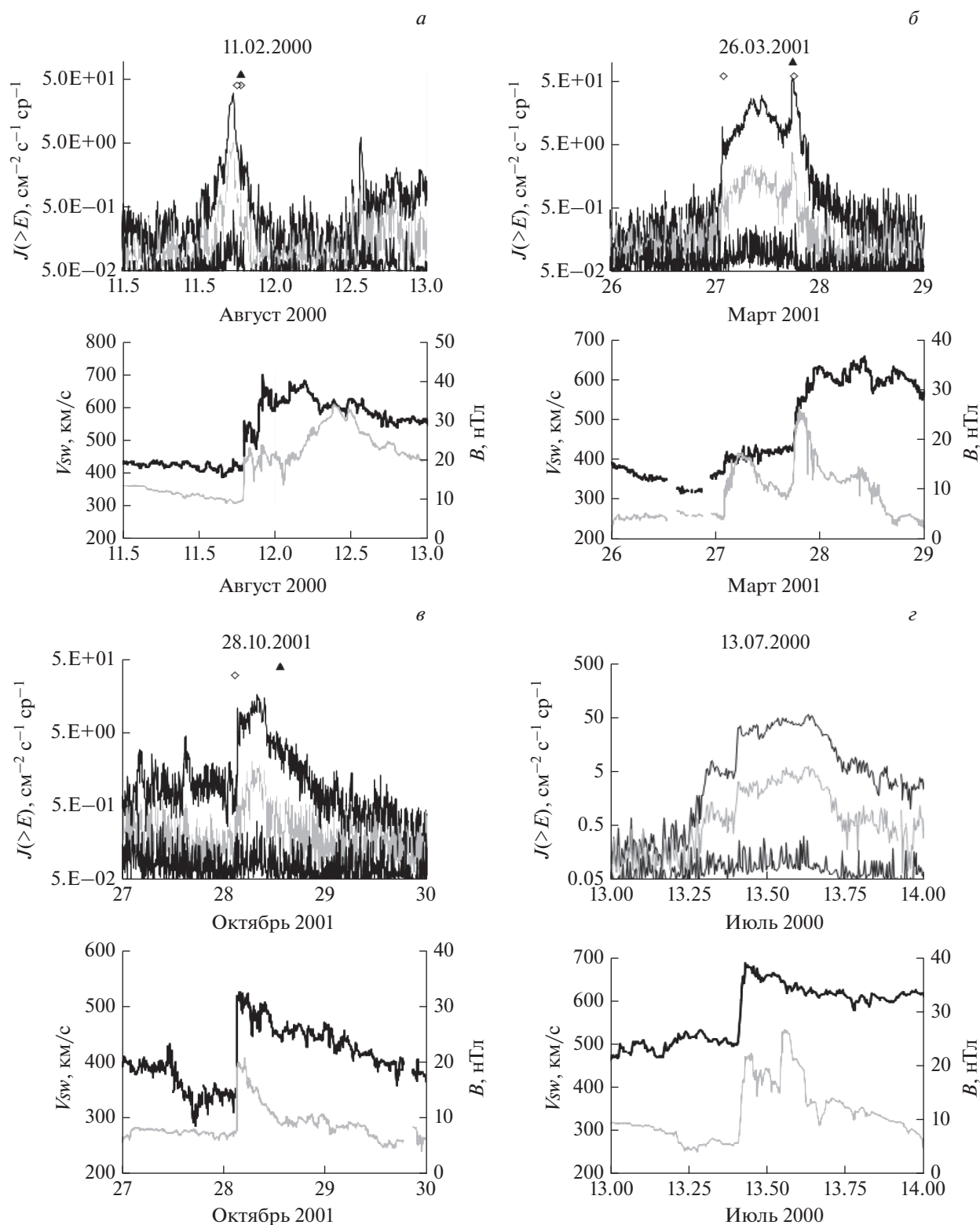


Рис. 2. Соотношение между потоками частиц и параметрами межпланетной среды. Верхние панели — потоки протонов с энергией выше 5 МэВ (верхняя черная линия), 10 МэВ (серая линия) и 30 МэВ (нижняя черная линия) по данным спутника GOES [URL OMNI]; треугольники — SC, ромбы — ударные волны. Нижние панели: черная линия — индукция ММП B , серая линия — скорость солнечного ветра V_{sw} .

блюдаемых параметрах межпланетной среды B и V_{sw} даже в случае идентификации ударных волн в базах [URL shock, URL Wind].

Нужно отметить, что мы произвели только первое сопоставление изолированных событий ESP с параметрами межпланетной среды, выбрав для этого сравнение временных зависимостей потоков протонов с индукцией межпланетного магнитного поля B и скоростью солнечного ветра V_{sw} . В будущем необходимо детально анализировать временные и энергетические характеристики частиц и различные параметры среды, такие как плотность и температура плазмы, число Маха, ориентация фронта ударной волны относительно окружающего поля и др.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы выбрали 9 изолированных событий СПС малой мощности, сопровождавшихся межпланетными возмущениями, источник которых на Солнце, согласно работам [Логачев и др., 2016, 2022], был неопределенным. Для 8 из них удалось найти достаточно мощные эруптивные процессы на Солнце, включающие вспышки и быстрые КВМ, произошедшие за десятки часов до наблюдаемого прихода частиц на Землю. Мы предполагаем, что частицы, ускоренные этими вспышками и КВМ вблизи Солнца, не дошли до земного наблюдателя, а поскольку все выбранные события происходили во время прихода ударных волн на Землю, они скорее всего содержат частицы, ускоренные межпланетными ударными волнами, т.е. являются изолированными событиями ESP. Почти все они сопровождались двумя или более фронтами ударных волн и имели вид струй протонов, ограниченных структурами межпланетного магнитного поля, что отличает их от большинства событий ESP с протонами ниже 10 МэВ, представленных в литературе (например, [Giacalone, 2012; Chiappetta et al., 2021]). Длительность таких событий ESP – примерно 1 сут. Ударные волны, по-видимому, ускоряли и удерживали частицы в ограниченной области пространства. Известно, что при распространении в межпланетной среде между сближающимися ударными волнами частицы могут ускоряться до нескольких ГэВ. Такие редкие события не были изолированными – они наблюдались на фоне спада временного профиля солнечных протонов в наземных возрастаниях СКЛ типа GLE [Кузьмин и др., 1983].

В этой работе мы лишь приступили к анализу изолированных событий ESP с протонами с энергией выше 10 МэВ. Отождествление источника на Солнце – сложная задача, каждое событие требует учета многих факторов, который пока не производился. Поэтому информация об источниках носит предварительный характер. Сопоставление характеристик потоков протонов со структурами

параметров межпланетной среды также требует дальнейших исследований.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим всех исследователей, представляющих через Интернет свои данные о потоках протонов и параметрах солнечного ветра (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>);

вспышках на Солнце (<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/>);

КВМ (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/);

радиоизлучении II типа (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/radio/waves_type2.html);

ударных волнах (<http://ipshocks.fi/database>, https://www.lmsal.com/solarsoft/latest_events_archive.html, <https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>, <http://www.iki.rssi.ru/omni/>)

и геомагнитных возмущениях (<https://www.obsebre.es/en/rapid#ssc>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Канорцева К.Б., Шугай Ю.С. Использование DBM модели для прогноза прихода корональных выбросов массы к земле // Космич. исслед. Т. 59. № 4. С. 315–326. 2021.
<https://doi.org/10.31857/S0023420621040026>
- Крымский Г.Ф. Регулярный механизм ускорения заряженных частиц на фронте ударной волны // Докл. АН СССР. Т. 234. № 6. С. 1306–1308. 1977.
- Кузьмин А.И., Филиппов А.Т., Чирков Н.П. Крупномасштабные возмущения солнечного ветра и ускорение космических лучей в межпланетной среде // Изв. АН СССР. Сер. физ. Т. 47. № 9. С. 1703–1707. 1983.
- Логачёв Ю.И., Базилевская Г.А., Вашенюк Э.В. и др. Каталог солнечных протонных событий 23-го цикла солнечной активности (1996–2008 гг.). Москва – 2016. http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/katalog_SPS_23_cikla_SA.pdf. 2016.
<https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD>
- Логачёв Ю.И., Базилевская Г.А., Власова Н.А. и др. // Каталог солнечных протонных событий 24-го цикла солнечной активности (2009–2019 гг.). М.: Мировой центр данных по солнечно-земной физике. 970 с. 2022.
<https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-008>
- Ameri D., Valtonen E., Al-Sawad A., Vainio R. Relationships between energetic storm particle events and interplanetary shocks driven by full and partial halo coronal mass ejections // Adv. Space Res. V. 71. № 5. P. 2521–2533. 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.12.014>
- Barnard L., Owens M.J., Scott C.J. et al. Quantifying the uncertainty in CME kinematics derived from geometric modeling of heliospheric imager data // Space Weather V. 20. e2021SW002841. 2022.
<https://doi.org/10.1029/2021SW002841>

- *Bell A.R.* The acceleration of cosmic rays in shock fronts – II // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* V. 182. P. 443–455. 1978.
- *Brueckner G.E., Howard R.A., Koomen M.J. et al.* The Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO) // *Sol. Phys.* V. 162. P. 357–402. 1995.)
<https://doi.org/10.1007/BF00733434>
- *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.* V. 67. № 13. P. 4983–5000. 1962.
<https://doi.org/10.1029/JZ067i013p04983>
- *Chiappetta F., Laurenza M.L., Lepreti F.L., Consolini G.* Proton Energy Spectra of Energetic Storm Particle Events and Relation with Shock Parameters and Turbulence // *Astrophys. J.* V. 915. № 1. Art. № 8. 2021.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/abfe09>
- *Cohen C.M.S., Christian E.R., Cummings A.C. et al.* Energetic Particle Increases Associated with Stream Interaction Regions // *The Astrophysical J. Supplement Series* V. 246. Issue 2. id.20. 10 p. 2020.
<https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab4c38>
- *Decker R.B.* The modulation of low-energy proton distributions by propagating interplanetary shock waves – A numerical simulation // *J. Geophys. Res.* V. 86. P. 4537–4554. 1981.
<https://doi.org/10.1029/JA086iA06p04537>
- *Ebert R.W., Dayeh M.A., Desai M.I., Jian L.K., Li G., Mason G.M.* Multispacecraft analysis of energetic heavy ion and interplanetary shock properties in energetic storm particle events near 1 au // *Astrophys. J.* V. 831:153 (21pp). 2016.
<https://doi.org/10.3847/0004-637X/831/2/153>
- *Giacalone J.* Energetic charged particles associated with strong interplanetary shocks // *Astrophys. J.* V. 761:28 (12pp). 2012.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/761/1/28>
- *Gopalswamy N., Lara A., Lepping R.P. et al.* Interplanetary acceleration of coronal mass ejections // *Geophys. Res. Lett.* V. 27. P. 145–148. 2000.
<https://doi.org/10.1029/1999GL003639>
- *Kamide Y., Maltsev Y.P.* Geomagnetic storms in Hand book of the Solar Terrestrial environment. Ed. Y. Kamide, A. Chain: Springer. 356–377, 2007.
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-46315-3>
- *Lario D., Hu Q., Ho G.C., Decker R.B., Roelof E.C., Smith C.W.* Statistical properties of fast forward transient interplanetary shocks and associated energetic particle events: ACE observations // *Proc. Solar Wind 11 – SOHO 16 “Connecting Sun and Heliosphere”*, Whistler, Canada 12–17 June 2005 (ESA SP-592, September 2005).
- *Shi Y., Chen Y., Liu S. et al.* Predicting the CME arrival time based on the recommendation algorithm // *Research in Astronomy and Astrophysics* V. 21. № 8. 190 (16pp). 2021.
<https://doi.org/10.1088/1674-4527/21/8/190>
- *Suresh K., Gopalswamy N., Shanmugaraju A.* Arrival Time Estimates of Earth-Directed CME-Driven Shocks // *Sol. Phys.* V. 297:3. 2022.
<https://doi.org/10.1007/s11207-021-01914-1>
- *Zhao X., Dryer M.* Current status of CME/shock arrival time prediction // *Space Weather*. V. 12. P. 448–469. 2014.
<https://doi.org/10.1002/2014SW001060>
- URL Wind https://www.lmsal.com/solarsoft/latest_events_archive.html
- URL CME https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/
- URL flares <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/>
- URL IKI <http://www.iki.rssi.ru/omni/>
- URL OMNI <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>
- URL R&C <https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>
- URL SC <https://www.obsebre.es/en/rapid#ssc>
- URL shock <http://ipshocks.fi/database>
- URL Type II https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/radio/waves_type2.html,
https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-radio/radio-bursts/reports/spectral-listings/Type_II/