

## ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ НА СОЛНЦЕ И В МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЕ НА СОЛНЕЧНОЕ ПРОТОННОЕ СОБЫТИЕ 30.03.2022 г.

© 2025 г. Н. А. Власова<sup>1, \*</sup>, Г. А. Базилевская<sup>2</sup>, Е. А. Гинзбург<sup>3</sup>, Е. И. Дайбог<sup>1</sup>,  
В. В. Калегает<sup>1, 4</sup>, К. Б. Капорцева<sup>1, 4</sup>, Ю. И. Логачев<sup>1</sup>, И. Н. Мягкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына  
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Москва, Россия

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

<sup>3</sup>Институт прикладной геофизики им. акад. Е. К. Федорова Росгидромета (ИПГ Росгидромета),  
Москва, Россия

<sup>4</sup>Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ),  
Москва, Россия

\*e-mail: nav19iv@gmail.com

Поступила в редакцию 02.03.2024 г.

После доработки 01.04.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

Представлены результаты сравнительного анализа солнечного протонного события 30.03.2022 г., имеющего необычный временной профиль потоков солнечных протонов, с предыдущим и последующим солнечными протонными событиями: 28.03.2022 г. и 02.04.2022 г. Возрастания потоков энергичных протонов в межпланетном и в околоземном пространстве ассоциируются с последовательными солнечными вспышками рентгеновских баллов M4.0, X1.3 и M3.9 и тремя корональными выбросами массы типа гало. Работа сделана по экспериментальным данным, полученным с космических аппаратов, расположенных в межпланетном пространстве (ACE, WIND, STEREO A, DSCOVR), на круговой полярной орбите на высоте 850 км (Метеор-M2) и на геостационарной орбите (GOES-16, Электро-Л2). Предложено объяснение особенностей профиля потока энергичных протонов в солнечном протонном событии 30.03.2022 г.: протоны, ускоренные во вспышке 30.03.2022 г., были частично экранированы межпланетным корональным выбросом массы, источником которого стали взрывные процессы на Солнце 28.03.2022 г.; поздняя регистрация максимальных потоков протонов, одновременная для частиц разных энергий, обусловлена приходом потоков частиц внутри межпланетного коронального выброса массы. Пространственное распределение солнечных протонов на околоземной орбите было подобным распределению в точке Лагранжа L1, но с запаздыванием ~50 мин.

**Ключевые слова:** солнечное протонное событие, солнечная вспышка, корональный выброс массы, солнечный ветер, межпланетное магнитное поле

**DOI:** 10.31857/S0016794025010031, **EDN:** AENOID

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Солнечные протонные события (СПС), регистрируемые в околоземном пространстве, являются результатом многих физических процессов, происходящих в солнечной короне, в межпланетной среде и даже в магнитосфере Земли. Статистические закономерности, типичные и экстремальные характеристики СПС могут быть определены с помощью каталогов СПС, которые

содержат многолетний однородный ряд экспериментальных данных (например, [Логачев и др., 2022]). Но только результаты исследования конкретного события рисуют истинную картину явлений, происходящих на Солнце и в межпланетной среде. Несмотря на многолетние исследования нет однозначного решения вопроса даже об источнике энергичных солнечных частиц. После открытия солнечных космических лучей именно вспышки считались их источником [Meyer et al.,

1956]. Результаты исследования корональных выбросов массы (КВМ) привели к пониманию, что возможно ускорение частиц и на ударных волнах, предваряющих КВМ [Kahler et al., 1984; Reames, 1995]. В настоящее время предполагается, что солнечные энергичные частицы ускоряются и в области солнечной вспышки, и на ударных волнах, связанных с КВМ (например, [Reames, 2013, 2017; Bazilevskaya, 2017; Klein and Dalla, 2017]). Ускорение на ударных волнах, сопровождающих КВМ, может происходить как во время зарождения КВМ на Солнце, так и в межпланетной среде (например, [Reames, 2013; Базилевская и др., 2023]). В то же время наблюдалось очень небольшое количество СПС, которые были ассоциированы только с КВМ без солнечной вспышки [Marqué et al., 2006]. Созданы модели распространения солнечных энергичных частиц, учитывающие ускорение частиц в короне Солнца и в межпланетной среде [Frassati et al., 2022; Zhang et al., 2023].

Главным фактором, определяющим динамические процессы в межпланетной среде, является межпланетное магнитное поле [Паркер, 1965]. Магнитные неоднородности, вмороженные в плазму солнечного ветра, влияют на движение солнечных энергичных частиц и обуславливают модуляцию их потоков с характерными временами от нескольких минут до нескольких суток. В частности, магнитные структуры солнечного ветра могут образовывать ловушки частиц, захватывая их в замкнутых областях пространства.

Эмпирическая “отражательная модель” предполагает захват и перенос частиц в полупрозрачных магнитных ловушках, образованных силовыми линиями межпланетного магнитного поля (ММП), вытянутыми от Солнца [Любимов, 1988; Любимов и Григоренко, 2007]. В работе [Дайбог и др., 2017] 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 (*Stream Interaction Region*, SIR). Если разноскоростные потоки существуют длительное время, вращаясь вместе с Солнцем, то возникают коротирующие области взаимодействия (*Corotating Interaction Regions*, CIR), которые могут оказывать влияние на динамику солнечных энергичных частиц (например, [Richardson, 2004, 2018]). В работах [Reames, 2013, 2023] описаны области пространства за распространяющимся ударным фронтом, содержащие захваченные частицы. В работе [Vlasova et al., 2024] для объяснения длительного наблюдения

в гелиосфере потоков солнечных энергичных протонов предложено существование замкнутой области-ловушки, сформированной двумя межпланетными корональными выбросами массы (МКВМ) и областями взаимодействия высокоскоростных и медленных потоков солнечного ветра.

Известно, что МКВМ оказывают воздействие на поток солнечных энергичных частиц. По данным КА Explorer-12 было обнаружено возрастание потоков энергичных частиц, названных быстрыми штормовыми частицами (*Energetic Storm Particles*), перед “плазменным облаком”, вызвавшим магнитную бурю на Земле [Bryant et al., 1962]. В работе сделан вывод о том, что это — солнечные протоны, захваченные внутрь плазменного облака. Результаты исследования прихода солнечных протонов на КА SOHO, когда КА находился в магнитном облаке, свидетельствуют, что магнитное поле в структуре КВМ обеспечивает “магистральный” путь для распространения потоков протонов [Torsti et al., 2004]. Использование солнечных энергичных частиц в качестве инструмента для исследования топологии магнитного поля двух магнитных облаков показало, что в одном случае по отражению частиц нужно представить магнитную петлю, как бутылку, соединенную с Солнцем, во втором случае отражение происходит от магнитного зеркала, образованного полем сжатия за ударной волной, то есть это — топология открытых силовых линий [Tan et al., 2014]. В работе [Shen et al., 2008] показано, что поток протонов с энергией  $\geq 10$  МэВ в событии 05.11.2011 был самым большим в 23 цикле солнечной активности вследствие того, что частицы попали в структуру, состоящую из ударной волны и магнитного облака. В то же время для события 14.07.2000 (GLE 59) на профиле потоков протонов с энергией от 1 до 100 МэВ наблюдается двух-этапное быстрое падение интенсивности, связанное с областью сжатия и магнитным облаком [Wu and Quin, 2020]. В работе [Cane et al., 1988] представлены результаты исследования влияния ударной волны, предшествующего КВМ, который находится на пути распространения частиц в межпланетной среде, на временные профили солнечных протонов в зависимости от гелиодолготы их источника. В работе [Kahler and Reames, 1991] делается вывод, что магнитные облака почти прозрачны для солнечных частиц (электронов с  $E = 0.2\text{--}2$  МэВ, протонов с  $E = 22\text{--}27$  МэВ, КА ISEE-3) и поля магнитных облаков не замкнуты. В работе [Masson et al., 2012] на основе результатов исследования событий GLE по данным нейтронных мониторов показано, что время прибытия первых частиц высоких энергий на Землю во многом определяется

типом ММП, в котором частицы распространяются. Начальное время прихода соответствует ожидаемому в модели Паркера при медленном солнечном ветре и значительно больше в гелиосферных структурах, таких как МКВМ. В работе [Kocharov et al., 2005] делается вывод, что структура КВМ, подобная магнитной ловушке, значительно изменяет профиль интенсивности-времени высокоэнергичных частиц, наблюдавшихся на 1 а.е. Спад потока частиц после максимума происходит медленнее, чем при моделировании по магнитному полю в виде спирали Архимеда, и может быть аппроксимирован экспоненциальной функцией.

Цель данной работы — объяснить причины формирования сложного временного профиля потоков солнечных энергичных протонов 30–31.03.2022 г., отличающегося от соответствующих профилей в предыдущем и последующем солнечных протонных событиях 28.03.2022 г. и 01.04.2022 г., основываясь на результатах анализа солнечных источников энергичных частиц и высокоскоростных потоков солнечного ветра, а также условий в межпланетной среде, в которых солнечные протоны распространялись от Солнца до орбиты Земли.

## 2. ИСТОЧНИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Исследование временных профилей потоков солнечных протонов 28.03.2022 г., 30.03.2022 г. и 02.04.2022 г. выполнено на основе экспериментальных данных, полученных с космических аппаратов (КА), расположенных в межпланетном пространстве и в магнитосфере Земли (табл. 1).

КА STEREO A в исследуемый период (30.03.2022 г.) был расположен на расстоянии 0.97 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 35.3° восточнее, чем соответствующая область для Земли [Gieseler et al., 2022; <https://solar-mach.github.io/>].

Электронные ресурсы, из которых получена необходимая для исследования информация:

— по солнечным вспышкам и корональным дырам (<https://www.solarmonitor.org/>);

— по корональным выбросам массы с коронографа LASCO/C2 на КА SOHO ([https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/));

— по положению диммингов для определения гелиокоординат КВМ (<https://www.sidc.be/solardemon/>);

**Таблица 1.** Источники информации о потоках солнечных энергичных протонов и параметрах солнечного ветра и межпланетного магнитного поля

КА	Орбита	Энергия протонов, МэВ
STEREO A	Гелиоцентрическая орбита, близкая к орбите Земли	40–60
ACE	Точка либрации L1 – 1.5 млн км от Земли к Солнцу	>10 >30
WIND	Точка либрации L1 – 1.5 млн км от Земли к Солнцу	28–72
DSCOVR	Точка либрации L1 – 1.5 млн км от Земли к Солнцу	—
Метеор-M2	Круговая, солнечно-синхронная, утренняя. Наклонение 98.8°, период обращения – 101.4 мин	10–160
GOES-16	Геостационарная орбита: высота ~36000 км; наклонение ~0°; долгота – 75.2° W	>5 >10 >30 >60 >100 >500
Электро-L2	Геостационарная орбита: высота ~36000 км; наклонение ~0°; долгота – 14.5° W	9–20 20–40



— по изображениям Солнца в различных длинах волн с КА SDO (<https://www.spaceweatherlive.com>; <https://www.sidc.be/solardemon/>);

— по синоптическим картам Солнца (<https://gong.nso.edu/>);

— по времени прихода ударных волн КВМ в околоземное космическое пространство (ОКП) (<https://zenodo.org/record/7991430>);

— по результатам моделирования прихода МКВМ в околоземное пространство службы прогноза солнечного ветра и КВМ ММИ им. Эйлера СПбГУ и ЛЭТИ (<https://solarwind.entroforce.ru/>);

— по солнечному ветру и межпланетному магнитному полю с КА ACE и КА DSCOVR (<https://swx.sinp.msu.ru/>);

— по потокам солнечных энергичных протонов с КА STEREO A и КА WIND (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>), с КА ACE и ИСЗ GOES-16, Метеор-М2, Электро-Л2 (<https://swx.sinp.msu.ru/>).

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 в межпланетной среде. Там же представлены электронные интерактивные версии каталогов солнечных протонных событий 24 и 25 циклов солнечной активности и ссылки на печатные варианты каталогов СПС 20–24 циклов солнечной активности ([https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep\\_events\\_cat/index.php?gcm=1&lang=ru](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.

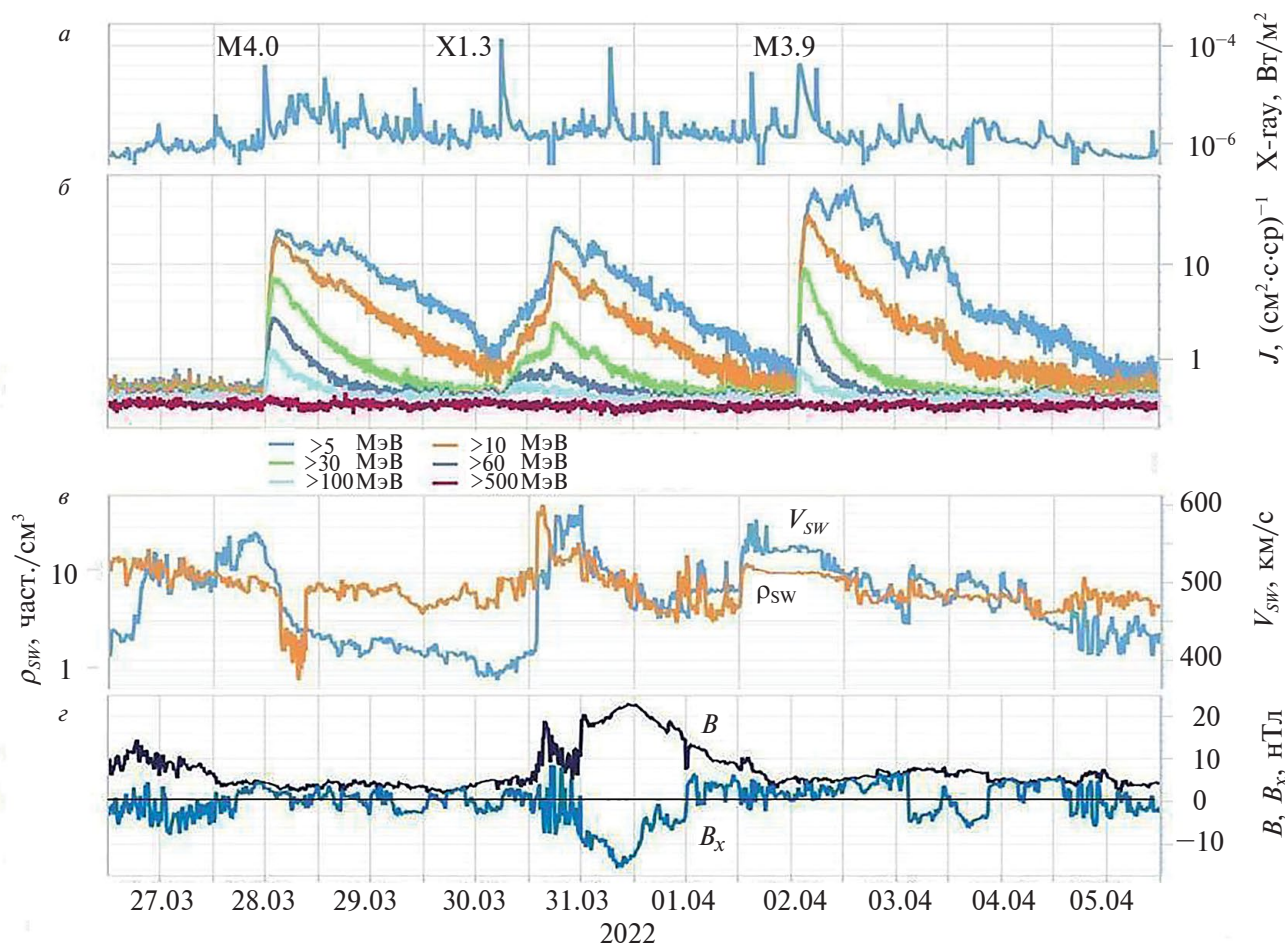
### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Особенностью обсуждаемого солнечного протонного события 30.03.2022 г. является то, что временные профили потоков частиц имеют более сложную форму по сравнению с профилями предшествующего (28.03.2022 г.) и последующего (02.04.2022 г.) событий (рис. 1б). СПС 28.03.2022 г., 30.03.2022 г. и 02.04.2022 г. ассоциируются с солнечными вспышками рентгеновских баллов (рис. 1а) M4.0 (W09), X1.3 (W31) и M3.9 (W68), соответственно (в скобках указана гелиодолгота вспыш-

ки). Вспышки 28.03.2022 г. и 30.03.2022 г. произошли в одной активной области. Все три вспышки сопровождались КВМ типа гало. Условия в межпланетной среде при распространении частиц трех СПС были различны (рис. 1в, 1г). Каждое событие сопровождалось высокоскоростным потоком солнечного ветра. В последней декаде марта 2022 года через центральный меридиан Солнца проходили две корональные дыры (КД): 22–24.03.2022 г. — приэкваториальная довольно большой площади; 29–31.03.2022 г. — среднеширотная небольшой площади. Высокоскоростные потоки солнечного ветра, через которые прошла Земля 27–28.03.2022 г. и 02.04.2022 г. (рис. 1в), могли иметь своими источниками именно эти КД, так как скорость потоков составляла ~550 км/с, что соответствует времени распространения от Солнца до Земли — ~3 дня. 28.03.2022 г. на Солнце в активной области AO12975, находившейся вблизи центра диска Солнца, с разницей во времени около 8 часов произошли две вспышки баллов M4.0 и M1.0, сопровождавшиеся корональными выбросами масс типа “гало”. С первой из вспышек ассоциируется СПС 28.03.2022 г., после второй вспышки дополнительного роста потока солнечных протонов зарегистрировано не было. Взаимодействие двух КВМ привело к образованию МКВМ, распространяющегося в сторону Земли. Приход ударной волны, связанной с этим МКВМ, был зафиксирован 31.03.2022 г. в 01:44 UT в точке L1 и в 02:24 UT на орбите Земли (<https://zenodo.org/record/7991430>).

Можно видеть, что во время СПС 30.03.2022 г. наблюдалось наиболее сильное ММП, а также длительное большое отрицательное значение  $V_x$ -компоненты ММП (рис. 1г). Временные профили потоков солнечных протонов, представленные на рис. 1б, построены по измерениям внутри магнитосферы Земли на ИСЗ GOES-16. Подобная форма всех трех профилей потоков энергичных протонов наблюдалась и в точке Лагранжа L1 на КА ACE (рис. 2а), и в области полярных шапок Земли на открытых силовых линиях магнитного поля Земли на ИСЗ Метеор-М2 в северной и южной полярных шапках (рис. 2б), и на геостационарной орбите на замкнутых силовых линиях на ИСЗ Электро-Л2 (рис. 2в). Следовательно, можно сказать, что особенности профилей потоков частиц 30.03.2022 г. не связаны с проникновением частиц в магнитосферу Земли.

Для более точной оценки отличий временного профиля потоков солнечных протонов 30–31.03.2022 г. от профилей в СПС 28.03.2022 г. и 02.04.2022 г. на рис. 3 представлены в едином масштабе профили потоков протонов по данным



**Рис. 1.** Временные профили 27.03.2022–05.04.2022 г.: (а) – плотности потока рентгеновского излучения Солнца с длиной волны 0.1–0.8 нм и (б) – потоков солнечных протонов по данным ИСЗ GOES-16, (в) – скорости и плотности солнечного ветра и (г) – модуля и  $B_x$ -компоненты ММП по данным КА DSCOVR.

ИСЗ GOES-16 в течение первых суток после солнечных вспышек, с которыми ассоциируются СПС. Можно выделить несколько особенностей профиля 30.03.2022 г. (рис. 3б):

- начало возрастания потоков частиц с энергией  $>5$  МэВ и  $>10$  МэВ происходит раньше времени возрастания потоков более энергичных частиц ( $E > 100$  МэВ), что свидетельствует против их происхождения из одного источника;

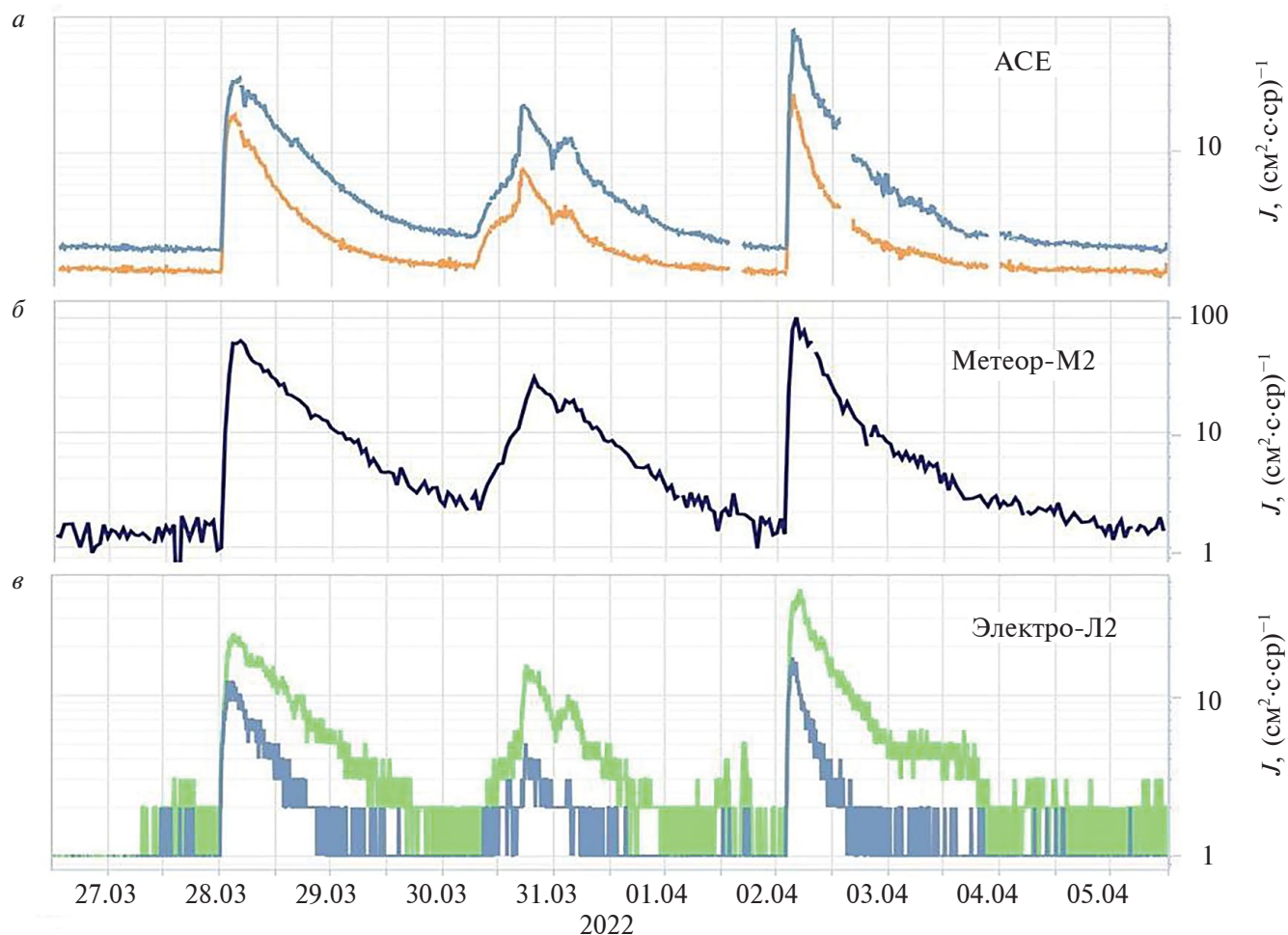
- интервал времени между началом вспышки и приходом частиц с  $E > 100$  МэВ для СПС 30.03.2022 г. составляет 109 мин, что значительно больше, чем для СПС 28.03.2022 г. (47 мин) и СПС 02.04.2022 г. (46 мин), и не коррелирует с расстоянием между долготой вспышки и долготой соединения Земли;

- интервал времени между началом вспышки и наблюдением максимальных за событие значе-

ний потоков протонов с  $E > 10$  МэВ для СПС 30.03.2022 г. (~12.6 час) существенно больше, чем для СПС 28.03.2022 г. (~4 час) и СПС 02.04.2022 г. (~3 час); время наблюдения максимума в СПС 28.03.2022 г. и 02.04.2022 г. зависит от энергии протонов, в СПС 30.03.2022 г. максимумы потоков протонов разных энергий наблюдались одновременно;

- максимальный поток протонов, особенно в области больших энергий, в СПС 30.03.2022 г. существенно меньше, чем в двух других событиях, несмотря на то, что балл рентгеновской вспышки 30.03.2022 г. наибольший: X1.3 по сравнению с M4.0 и M3.9;

- форма профиля потока частиц до максимума существенно отличается для события 30.03.2022 г.



**Рис. 2.** Временные профили потоков солнечных протонов 27.03.2022–05.04.2022 г.: (а) – с  $E > 10$  МэВ и  $E > 30$  МэВ по данным КА ACE; (б) – с  $E = 10$ –160 МэВ по данным ИСЗ Метеор-М2; (в) – с  $E = 9$ –20 МэВ и  $E = 20$ –40 МэВ по данным ИСЗ Электро-Л2.

На рис. 4 показаны СПС 28.03.2022 и 30.03.2022 по наблюдениям на КА WIND и на КА STEREO A, который в конце марта 2022 г. находился на расстоянии 0.97 а.е. от Солнца и на  $33.5^\circ$  восточнее Земли. Временные профили потоков солнечных протонов, измеренные в точке либрации  $L1$  на КА WIND и на КА STEREO A практически совпадают 28.03.2022 г. В событии 30.03.2022 г. профиль по данным КА STEREO A мало отличается от 28.03.2022 г., в то же время на КА WIND в точке  $L1$  наблюдается существенное различие профилей 28.03.2022 г. и 30.03.2022 г.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Сложный временной профиль потоков солнечных энергичных протонов 30–31.03.2022 г. может быть обусловлен особенностями процессов

генерации и ускорения частиц на Солнце и распространения в межпланетной среде.

##### 4.1. Условия на Солнце

Был проведен анализ солнечных источников потоков частиц и возмущенного солнечного ветра за исследуемый период времени по изображениям солнечного диска в ультрафиолетовом свете во времена, предположительно соответствующие наблюдению KBM в нижней короне Солнца (<https://www.spaceweatherlive.com/>), и по изображениям KBM в коронографе ([https://www.sidc.be/cactus/catalog/LASCO/2\\_5\\_0/ql/2022/03/](https://www.sidc.be/cactus/catalog/LASCO/2_5_0/ql/2022/03/)). Кроме этого изучались разностные изображения (получены последовательным вычитанием кадров из первого кадра для каждого наблюдения) на длине волны 21.1 нм (<https://www.sidc.be/solardemon/>), так называемые “коро-



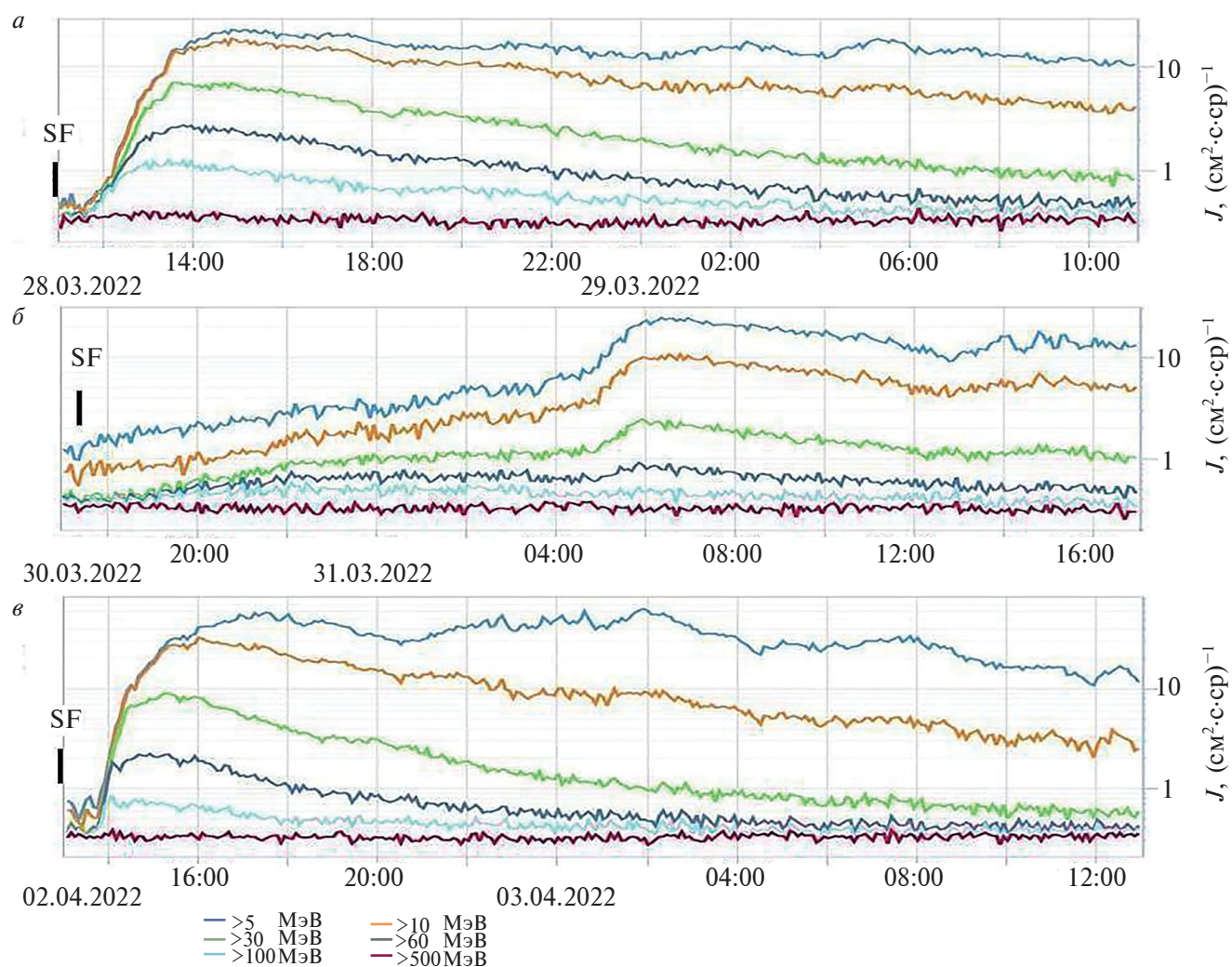


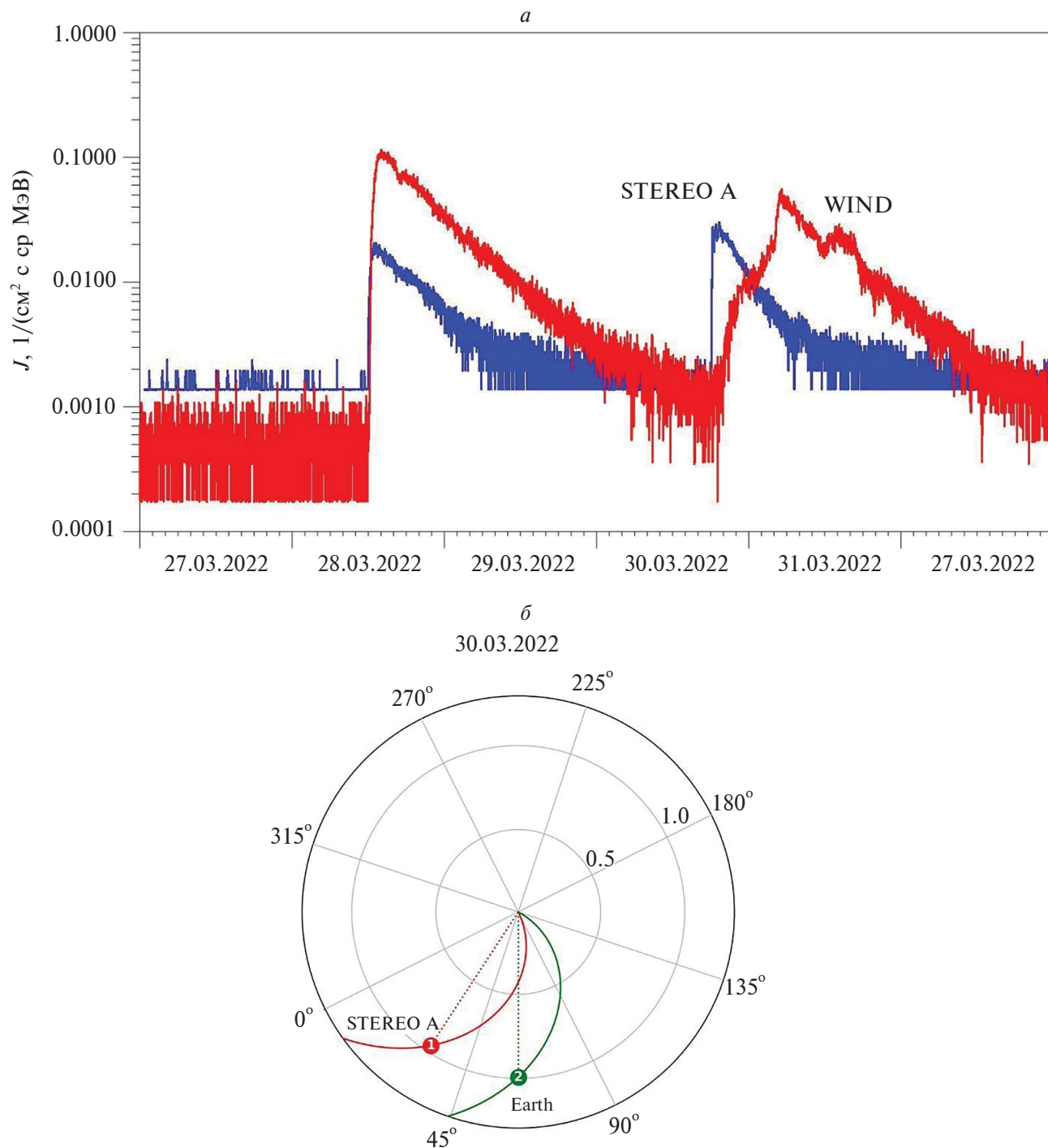
Рис. 3. Временные профили потоков протонов по данным IC3 GOES-16: (а) – с 11:00 UT 28.03.2022 г. до 11:00 UT 29.03.2022 г., (б) – с 17:00 UT 30.03.2022 г. до 17:00 UT 31.03.2022 г., (в) – с 13:00 UT 02.04.2022 г. до 13:00 UT 03.04.2022 г.

нальные димминги” – более темные участки на изображении, обусловленные флуктуациями плотности в солнечной короне (например, [Reinard and Biesecker, 2008]). Корональные димминги могут быть связаны, в том числе, с выходом КВМ из короны. Результаты анализа показали, что расположение диммингов соответствует расположению вспышек и согласуется с направлением распространения КВМ, наблюдаемым в коронографе. Это говорит о том, что вспышки действительно сопровождались наблюдаемыми КВМ и процессы локализовались приблизительно в одной области Солнца, а также позволяет определить временные и пространственные параметры эволюции КВМ на ранних стадиях.

В табл. 2 представлены параметры солнечных вспышек и корональных выбросов массы, актив-

ные области (АО) на Солнце и расчетные величины, полученные по изображениям Солнца и по средней скорости солнечного ветра во время наблюдения СПС.

Во время ранней эволюции КВМ могут повлиять на корональное распространение солнечных протонов (например, [Zhang et al., 2023]). Мы сравнили характеристики соответствующих диммингов, чтобы проверить, могли ли различия СПС, наблюдаемые 28.03.2022 г., 30.03.2022 г. и 02.04.2022 г., быть объяснены отличием распространения протонов в солнечной короне. Мы оценили разницу во времени между вспышкой (по данным рентгеновского излучения) и началом расширения КВМ (по данным разностных изображений Солнца). В случае СПС 30.03.2022 г. это наименьшее время: 9 минут по сравнению



**Рис. 4.** (а) — Временные профили потоков протонов с  $E = 28\text{--}72$  МэВ по данным КА WIND и с  $E = 40\text{--}60$  МэВ КА STEREO A с 27.03.2022 г. по 01.04.2022 г. (б) — Схема расположения КА STEREO A и Земли 30.03.2022 г. (<https://solar-mach.github.io/>).

с 22 и 19 минутами. Параметры трех КВМ, полученные по данным коронографа, различаются незначительно (табл. 2), хотя КВМ 30.03.2022 г. менее быстрый, а его позиционный угол наибольший.

По величине средней скорости солнечного ветра во время прихода первых солнечных энергичных протонов в околоземное пространство рассчитана долгота области на Солнце, связанной с Зем-



**Таблица 2.** Параметры солнечных вспышек и корональных выбросов массы, активные области (АО) на Солнце и расчетные величины

Вспышки: дата, время начала (UT)	28.03.2022 г. 10:58	28.03.2022 г. 19:08	30.03.2022 г. 17:21	02.04.2022 г. 12:56
Координаты вспышек, балл, АО	N12W09 M4.0 12975	N14W07 M1.0 12975	N13W31 X1.3 12975	N12W68 M3.9 12976
Данные по КВМ *	N14W04 11:20 22 мин	N14W12	N13W32 17:30 9 мин	N15W69 13:15 19 мин
КВМ: время появления в поле зрения коронографа (UT)	12:00	20:24	18:00	13:36
КВМ: скорость и параметры раствора**	702 км/с 360° 127°	905 км/с 360° 299°	641 км/с 360° 298°	1433 км/с 360° 263°
$V_{sw}$ $W_{\phi}$ $\Delta\phi^{***}$	520 км/с W43 34°	— — —	400 км/с W58 27°	550 км/с W42 –26°
КВМ: скорость и время коронального расширения	1000 км/с 8 мин	— —	1000 км/с 6 мин	1000 км/с 5 мин
Время прихода протонов с $E > 100$ МэВ (UT), $\Delta T$ от вспышки	11:45 47 мин	— —	19:10 109 мин	13:40 мин

*Примечание.* \* Координаты КВМ (димминга), время начала расширения КВМ в короне Солнца (UT) и  $\Delta T$  от начал вспышки до расширения КВМ.

\*\* Скорость КВМ по коронографу, угловой раствор (угловая ширина) КВМ вблизи Солнца, позиционный угол самого быстрого сегмента переднего края КВМ — МРА (*measurement position angle*).

\*\*\* Солнечный ветер и связанная с ним долгота силовой линии от Земли ( $W_{\phi}$ ) и  $\Delta\phi$  между ней и долготой вспышки.

лей силовыми линиями межпланетного магнитного поля. Различие между полученной долготой и долготой вспышки соответствует угловому расстоянию коронального распространения протонов. Для СПС 30.03.2022 г. оно практически наименьшее. Результаты анализа, представленные в табл. 2, показывают, что во всех трех случаях разница между долготой источника и геоэффективной долготой не может обеспечить наблюдаемое различие во времени регистрации СПС у орбиты Земли. Также и скорости КВМ, определенные в коронографе, не свидетельствуют о принципиальных отличиях события 30.03.2022 г. от остальных. Если принять скорость коронального расширения  $\sim 1000$  км/с, то время коронального распространения от точки начала возмущения до геоэффективной долготы будет равно 8, 6 и 5 мин для трех последовательных рассматриваемых событий. Таким образом, особенности временного профиля потоков частиц

30.03.2022 г. не были связаны с распространением частиц в короне Солнца.

Анализ синоптических карт Солнца (<https://gong.nso.edu/>) показал, что 28.03.2022 г. вспышка и точка соединения с КА STEREO A находились в области отрицательного магнитного поля, а точка соединения с Землей (с точкой либрации  $L1$ ) — в области положительного поля и отделена от вспышки линией раздела полярностей, но характеры временных профилей потоков частиц на КА STEREO A и в точке  $L1$  совпадают (рис. 4а).

В событии 30.03.2022 г. относительное расположение вспышки, КА STEREO A и Земли изменилось мало, тогда как профили начальной фазы возрастания потоков протонов по данным КА STEREO A и КА WIND различаются очень существенно. Следовательно, граница раздела полярностей не оказала влияния на корональное распространение протонов в событии 30.03.2022 г.

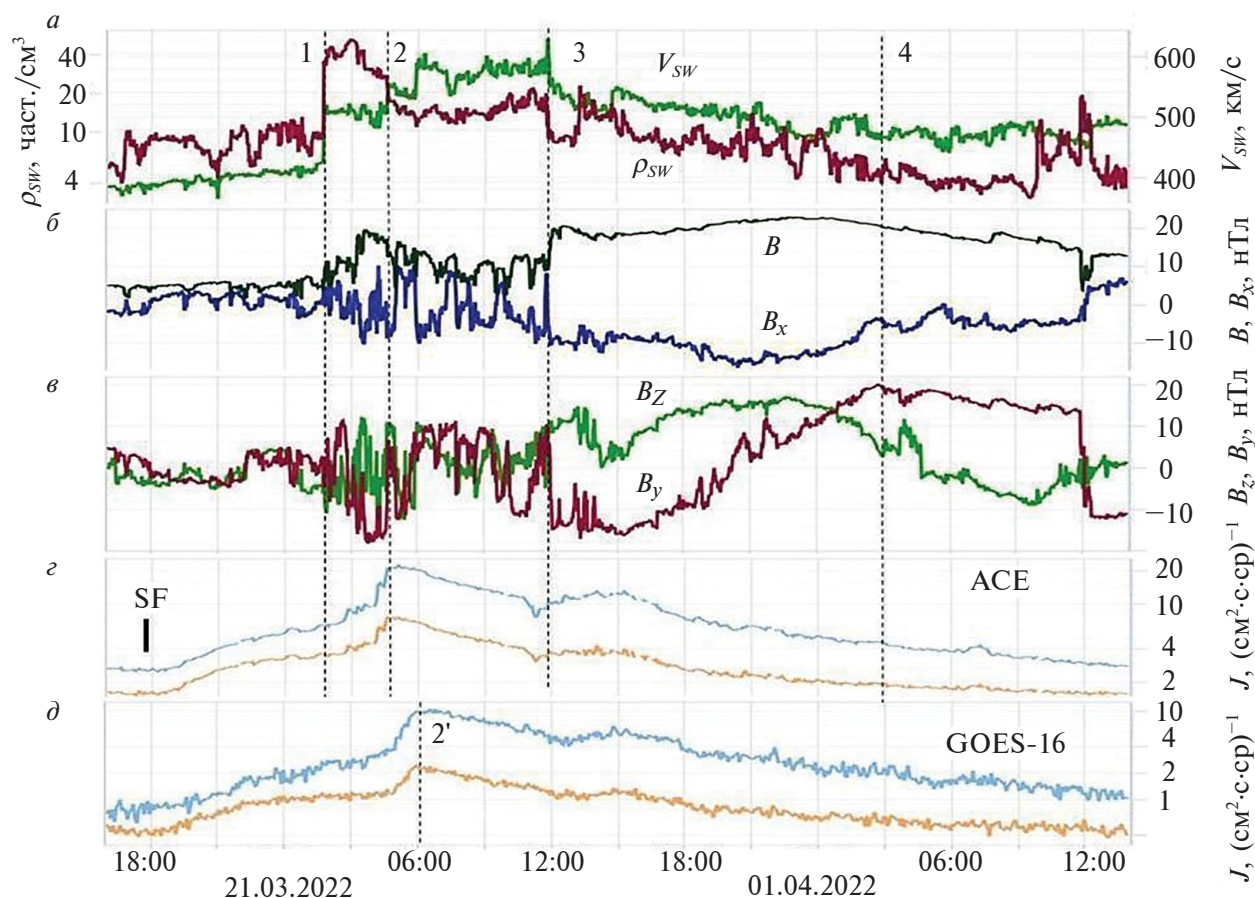
Этот вывод согласуется с ранее полученными результатами исследования, свидетельствующими, что пересечения гелиосферного токового слоя не влияют на спад профиля потоков солнечных протонов с энергией 1–5 МэВ [Kecskeméty et al., 2009]. Приведенные выше результаты исследования условий и процессов на Солнце во время трех рассматриваемых событий не дают возможности существенным образом выделить СПС 30.03.2022 г.

#### 4.2. Условия в межпланетной среде

Рассмотрим возможное влияние условий в межпланетной среде на поток солнечных протонов, распространяющихся от Солнца к околоземному пространству. 28.03.2022 г. в АО 12975 зарегистрировано 2 КВМ, причем второй из них, наблюдавшийся на ~8 ч позже, обладал большей скоростью (табл. 2) и ускорением: на 20Rs (Rs — радиус Солнца) первый КВМ имел нулевую скорость, а второй — 1300 км/с. Взаимодействие двух

КВМ привело к образованию МКВМ, ударная волна которого достигла точки L1 31.03.2022 г. в 01:44 UT, а Земли в 02:24 UT (<https://zenodo.org/record/7991430>).

На рис. 5 представлена временная структура МКВМ в точке L1 и потоков протонов в L1 по данным КА ACE и на геостационарной орбите по данным ИСЗ GOES-16. Вертикальные пунктирные линии соответствуют особенностям временного профиля МКВМ и потоков солнечных протонов. Линия 1 показывает время прихода ударного фронта в точку L1, за которым следует турбулентная область (участок между линиями 1 и 3 на этом рисунке) с быстрыми изменениями компонент ММП, характерными для оболочки магнитного облака [Burlaga et al., 1981; Burlaga, 1988]. Внутри этой области между линиями 1 и 2 наблюдалось более сильное ММП, которое сопровождалось ростом потоков солнечных протонов до максимальных значений по данным КА ACE. Структуры ММП перед линией 3, соот-



**Рис. 5.** Временные профили с 16:00 UT 30.03.2022 г. до 14:00 UT 01.04.2022 г.: (а) — скорости и плотности солнечного ветра по данным КА DSCOVR; (б) — модуля  $B$  и  $B_x$  и (в) —  $B_y$ - и  $B_z$ -компонент ММП по данным КА DSCOVR; потоков солнечных протонов с энергией  $>10$  и  $>30$  МэВ по данным (г) — КА ACE и (д) ИСЗ GOES-16.

ветствующие внутренней части турбулентной области, сопровождались небольшим локальным спадом потоков частиц на КА ACE. Линия 3 соответствует входу в магнитное облако, с характерными свойствами [Burlaga et al., 1981; Burlaga, 1988; Pal et al., 2020; Vörös et al., 2021]: усиленным магнитным полем, медленными изменениями его направления (признаками вращения вектора поля), практическим отсутствием флуктуаций ММП, низкой плотностью солнечного ветра и низкой температурой плазмы (не показанной на рисунке). В момент 4, по нашему мнению, наблюдается выход из магнитного облака, так как существенно уменьшается скорость изменения направления магнитного поля ( $B_x$ - и  $B_y$ -компоненты практически перестают изменяться). В каталоге (<https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>) приведена только длительность всего МКВМ (12:00 UT 31.03.2022 г. — 12:00 UT 01.04.2022 г.).

Как видно на рис. 5, между временными профилями потоков протонов, измеренных на КА ACE и на ИСЗ GOES-16, существует временной сдвиг ~50 мин — время, необходимое солнечному ветру для преодоления 1.5 млн км со скоростью солнечного ветра (~500 км/с), которая наблюдается в данный момент в точке  $L1$  (рис. 5б). Структура магнитного поля внутри МКВМ поддерживала практически постоянное пространственное распределение потоков частиц внутри него, что может означать распространение протонов с энергиями по крайней мере до 60 МэВ в пространстве вместе с МКВМ. Это явление требует дальнейшего изучения. Таким образом, особенности временного профиля потоков солнечных протонов в событии 30.03.2022 объясняются условиями в межпланетной среде, в частности, ролью МКВМ. Следует отметить, что этот МКВМ миновал КА STEREO A, на котором никаких особенностей временного профиля потоков протонов не наблюдалось.

Можно попытаться оценить радиальный размер гелиосферной структуры, через которую проходит Земля:

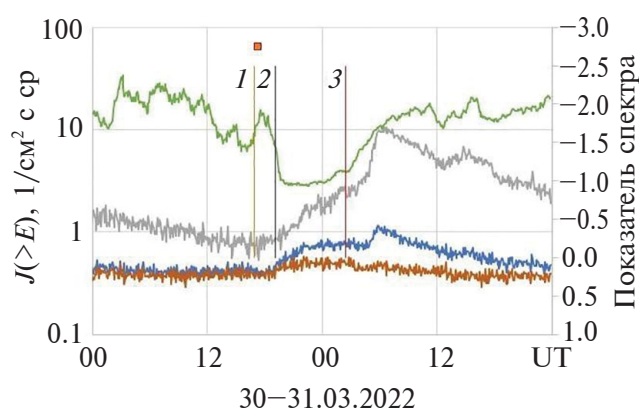
- полный радиальный размер МКВМ (по каталогу (<https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>) с 12:00 UT 31.03.2022 г. до 12:00 UT 01.04.2022 г.) при средней скорости солнечного ветра 500 км/с составляет 0.3 а.е.;

- радиальный размер магнитного облака (между пунктирами 3 и 4 на рис. 5) — 0.18 а.е.

Оценка размеров МКВМ 31.03.2022 г. согласуется с ранее полученными результатами:  $0.2 \div 0.4$  а.е. [Lepping et al., 1990].

Анализ динамики показателя энергетического спектра потоков протонов, при аппроксимации степенной функцией,  $E^{-\gamma}$  дает возможность более точно описать различные части сложного и необычного временного профиля потока частиц 30.03.2022 г. На рис. 6 показаны 5-минутные значения потоков протонов по данным ИСЗ GOES-16 и показатель интегрального энергетического спектра солнечных протонов в степенном представлении ( $E > 5$  МэВ  $\div E > 100$  МэВ). Для получения спектра вычтен фон — средние потоки протонов до исследуемых событий, в интервале с 00:00 UT 27.03.2022 г. по 11:35 UT 28.03.2022 г. Полученные по 5-минутным данным показатели спектра сглаживались по 13 точкам. Квадратиком отмечено начало солнечной вспышки 30.03.2022, вертикальными отрезками 1 и 2 — начало возрастания потоков протонов в каналах с  $E > 10$  МэВ и  $E > 60$  МэВ, отрезком 3 — приход ударного фронта.

Можно видеть, что начало роста потоков частиц малых энергией наблюдалось раньше начала возрастания частиц высоких энергий. Эти частицы, скорее всего от предыдущего возрастания, были ускорены приближающимся ударным фронтом, который в момент вспышки 30.03.2022 был на расстоянии ~0.2 а.е. от Земли. Этот фронт привел также к задержке прихода первых частиц от вспышки 30.03.2022 г. в 17:21 UT. С приходом 30.03.2022 г. в ~19:05 UT более энергичных частиц от вспышки 30.03.2022 г. спектр становится более жестким,  $\gamma$  быстро уменьшается. Профили потоков частиц с  $E > 60$  МэВ и  $E > 100$  МэВ до ударной волны свидетельствуют об их диффузионном рас-



**Рис. 6.** Временные профили показателя степенного энергетического спектра потоков протонов (верхняя кривая) и потоков протонов с  $E > 10$ , 60 и 100 МэВ по данным ИСЗ GOES-16 30–31.03.2022 г.: 1 — начало возрастания потока протонов  $> 10$  МэВ, 2 —  $> 60$  МэВ, 3 — приход ударного фронта.



пространении. Увеличение  $\gamma$  после ударной волны связано с приходом частиц внутри МКВМ. С ~06 UT 31.03.2022 г. до начала 01.04.2022 г. наблюдается практически экспоненциальный спад потока протонов с характерным временем  $\sim 8$  ч. Показатель спектра  $\gamma$  плавно увеличивается. Это можно трактовать как конвективный перенос частиц в расширяющейся гелиосферной структуре и испытывающих адиабатическое охлаждение [Owens, 1979; Дайбог и др., 2004; Kecskeméty et al., 2009].

Представленные в данной работе результаты не первые по наблюдению воздействия МКВМ на поток солнечных энергичных частиц, но ранее полученные результаты были достаточно противоречивы (см. введение). Временные профили солнечных частиц, представленные в работе [Cane et al., 1988] и в более поздней книге [Reames, 2017], не похожи на профиль потока солнечных протонов 30.03.2022–01.04.2022 г. В отражательной модели накопления, переноса и распространения частиц предполагается существование магнитных структур, содержащих полупрозрачные барьеры/зеркала [Любимов и Григоренко, 2007]. В событии 30.03.2022 г. на рис. 5г можно видеть накопление частиц за барьером (момент 3), который сформирован сильным магнитным полем и областью с повышенными плотностью и скоростью солнечного ветра (рис. 5 б–в).

В работах [Reames, 2013, 2023] подробно обсуждаются “резервуары” — обширные области пространства за распространяющимся ударным фронтом, содержащие захваченные частицы. Резервуар располагается между ударным фронтом и Солнцем. Согласно [Reames, 2023] захват частиц в резервуар является результатом взаимодействия ускоренных на ударном фронте частиц с альвеновской 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. Гелиосферную структуру 31.03.2022 г. также можно рассматривать как резервуар, в который попадают частицы, уже ускоренные во время взрывного процесса на Солнце 30.03.2022 г. Частицы распространяются в межпланетной среде от Солнца к Земле внутри МКВМ. Таким образом, можно констатировать, что существует довольно большое разнообразие подходов к объяснению участия структур ММП и связанных с ними ударных волн в формирование наблюдаемых профилей протонов СПС.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов сравнительного анализа солнечного протонного события 30.03.2022 г. (X1.3), имеющего сложный временной профиль потоков солнечных протонов, с предыдущим и последующим солнечными протонными событиями: 28.03.2022 г. (M4.0) и 02.04.2022 г. (M3.9), предложен сценарий развития СПС 30.03.2022 г. в околоземном пространстве:

- 28.03.2022 г. в результате взрывных процессов на Солнце возникают два КВМ. Более поздний, но более быстрый КВМ догоняет более ранний, и формируется МКВМ.

- В момент начала солнечной вспышки в 17:21 UT 30.03.2022 г. ударный фронт МКВМ находился на расстоянии 0.2 а.е. от Земли.

- Солнечное событие 30.03.2022 г. начинается в 17:21 UT, в той же активной области, из которой вышли два КВМ, и через несколько минут протоны настигают МКВМ, величина магнитного поля в котором достигает 20 нТл.

- МКВМ препятствует распространению солнечных протонов к Земле.

- Пространственное распределение потоков протонов внутри МКВМ было подобным в точке L1 и на Земле, но с временным запаздыванием ~50 мин.

- Структура магнитного поля внутри МКВМ поддерживала практически постоянное пространственное распределение потоков частиц внутри него, что может означать распространение протонов с энергиями по крайней мере до 60 МэВ в пространстве вместе с МКВМ.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим всех исследователей, представляющих через Интернет свои данные о потоках протонов и параметрах солнечного ветра. Экспериментальные данные получены в Goddard Space Flight Center NASA: по солнечному ветру и межпланетному магнитному в OMNIWeb: High Resolution OMNI ([http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni\\_min.html](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html)); по потокам солнечных протонов в CDAWeb: the Coordinated Data Analysis Web (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>). Информация по солнечным вспышкам и корональным выбросам массы получена в Coordinated Data Analysis Workshops (CDAW) (<https://cdaw.gsfc.nasa.gov/>), SOHO LASCO CME CATALOG ([https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)). Времена прихода ударных волн КВМ получены на сайте (<https://zenodo.org/record/7991430>).

Благодарим сотрудников службы прогноза солнечного ветра (ММИ им. Эйлера СПбГУ, ЛЭТИ) (<https://solarwind.entroforce.ru/>), которые специально, по нашей просьбе, визуализировали ситуацию в гелиосфере 28.03.2022–03.04.2022 г.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базилевская Г.А., Дайбог Е.И., Логачев Ю.И. Изолированные события солнечных космических лучей, обусловленные приходом быстрых штормовых частиц (ESP) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63. № 4. С. 503–510. 2023. <https://doi.org/10.31857/S0016794023600254>
- Дайбог Е.И., Логачев Ю.И., Кейлер С., Кечкемети К. Серии солнечных событий с одинаковыми спадами как инструмент для выделения квазистационарных состояний межпланетного пространства // Космич. исслед. Т. 42. № 4. С. 376–383. 2004.
- Дайбог Е.И., Кечкемети К., Лазутин Л.Л., Логачев Ю.И., Сурова Г.М. 27-дневная периодичность потоков юпитерианских электронов на орбите Земли // Астрон. журн. Т. 94. № 12. С. 1062–1070. 2017. <https://doi.org/10.7868/S0004629917120027>
- Логачев Ю.И., Базилевская Г.А., Власова Н.А., Гинзбург Е.А., Дайбог Е.И., Ишков В.Н., Лазутин Л.Л., Неуен М.Д., Сурова Г.М., Яковчук О.С. Каталог солнечных протонных событий 24-го цикла солнечной активности (2009–2019 гг.). Москва: МЦД, 970 с. 2022. <https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-008>
- Любимов Г.П. Отражательная модель движения СКЛ в петлевых ловушках // Астрон. циркуляр АН СССР. № 1531. С. 19–20. 1988.
- Любимов Г.П., Григоренко Е.Е. Об отражательной модели солнечных космических лучей // Космич. исслед. Т. 45. № 1. С. 12–19. 2007.
- Паркер Е.Н. Динамические процессы в межпланетной среде / Под ред. Л.И. Дормана. М.: МИР, 1965.
- Bazilevskaya G.A. Once again about origin of the solar cosmic rays // Journal of Physics: Conf. Series. V. 798. P. 012034. 2017. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/798/1/012034/pdf>
- 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>
- Burlaga L., Sittler E., Mariani F., Schwenn R. Magnetic Loop Behind an Interplanetary Shock: Voyager, Helios, and IMP 8 Observations // J. Geophys. Res. V. 86. № A8. P. 6673–6684. 1981. <https://doi.org/10.1029/JA086iA08p06673>
- Burlaga L.F. Magnetic clouds and force-free fields with constant alpha // J. Geophys. Res., Space Physics. V. 93. № A7. P. 7217–7224. 1988. <https://doi.org/10.1029/JA093iA07p07217>
- Cane H.V., Reames D.V., von Rosenvinge T.T. The role of interplanetary shocks in the longitude distribution of solar energetic particles // J. Geophys. Res. V. 93. № A9. P. 9555–9567. 1988. <https://doi.org/10.1029/JA093iA09p09555>
- Frassati F., Laurenza M., Bemporad A., West M.J., Mancuso S., Susino R., Alberti T., Romano P. Acceleration of Solar Energetic Particles through CME-driven Shock and Streamer Interaction // Astrophysical Journal. V. 926. № 2. P. 227–246. 2022. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac460e>
- Gieseler J., Dresing N., Palmroos C. et al. Solar-MACH: An open-source tool to analyze solar magnetic connection configurations // Front. Astronomy Space Sci. V. 9. 2022. <https://www.frontiersin.org/journals/astronomy-and-space-sciences/articles/10.3389/fspas.2022.1058810/full>
- Kahler S.W., Sheeley Jr. N.R., Howard R.A., Koomen M.J., Michels D.J., McGuire R.E., von Rosenvinge T.T., Reames D.V. Associations between coronal mass ejections and solar energetic proton events // J. Geophys. Res. V. 89. № A11. P. 9683–9693. 1984. <https://doi.org/10.1029/JA089iA11p09683>
- Kahler S.W., Reames D.V. Probing the Magnetic Topologies of Magnetic Clouds by Means of Solar Energetic Particles // J. Geophys. Res. V. 96. № A6. P. 9419–9424. 1991. <https://doi.org/10.1029/91JA00659>
- Kecskeméty K., Daibog E.I., Logachev Y.I., Kóta J. The decay phase of solar energetic particle events // J. Geophys. Res. V. 114. № A6. 2009. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2008JA013730>
- Klein K.-L., Dalla S. Acceleration and Propagation of Solar Energetic Particles // Space Sci. Rev. V. 212. P. 1107–1136. 2017. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11214-017-0382-4>
- Kocharov L., Kovaltsov G.A., Torsti J., Huttunen-Heikinmaa K. Modeling the solar energetic particle events in closed structures of interplanetary magnetic field // J. Geophys. Res. V. 110. № A12. 2005. <https://doi.org/10.1029/2005JA011082>
- Lepping R.P., Jones J.A., Burlaga L.F. Magnetic Field Structure of Interplanetary Magnetic Clouds at 1 AU // J. Geophys. Res. V. 95. № A8. P. 11957–11965. 1990. <https://doi.org/10.1029/JA095iA08p11957>
- Marqué C., Posner A., Klein K.L. Solar energetic particles and radio-silent fast coronal mass ejections // Astrophys. J. V. 642. P. 1222–1235. 2006. <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/501157>
- Masson S., Démoulin P., Dasso S., Klein K.-L. The interplanetary magnetic structure that guides solar relativistic particles // Astron. & Astrophys. V. 538. № A32. 2012. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201118145>

- Meyer P., Parker E.N., Simson J.A. Solar Cosmic Rays of February, 1956 and Their Propagation through Interplanetary Space // *Phys. Rev.* V. 104. № 3. P. 768–783. 1956. [https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.104.768?casa\\_token=\\_yHvEACILcEAAAAA%3AN2b4irIb6lBxj2NRvyjzm\\_9GMXbDKcHv9Y\\_ecZcJZzI\\_q0ZDfqSIQOwNxV7QCcsWNn\\_7OfaXp2VqmgB](https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.104.768?casa_token=_yHvEACILcEAAAAA%3AN2b4irIb6lBxj2NRvyjzm_9GMXbDKcHv9Y_ecZcJZzI_q0ZDfqSIQOwNxV7QCcsWNn_7OfaXp2VqmgB)
- Owens A.J. Interplanetary diffusion of solar cosmic rays—A new approximate analytic solution // *J. Geophys. Res.* V. 84. № A8. P. 4451 – 4456. 1979. <https://doi.org/10.1029/JA084iA08p04451>
- Pal S., Dash S., Nandy D. Flux erosion of magnetic clouds by reconnection with the Sun's open flux // *Geophys. Res. Lett.* V. 47. № 8. e2019GL086372. 2020. <https://doi.org/10.1029/2019GL086372>
- Reames D.V. Solar energetic particles: A paradigm shift // *Rev. Geophys.* V. 33. S1. P. 585–589. 1995. <https://doi.org/10.1029/95RG00188>
- Reames D.V. The two sources of solar energetic particles // *Space Science Reviews.* V. 175. P. 53–92. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11214-013-9958-9>
- Reames D.V. Solar Energetic Particles. A Modern Primer on Understanding Sources, Acceleration and Propagation / Part of the book series: Lecture Notes in Physics (LNP, volume 932) 2017.
- Reames D.V. How Do Shock Waves Define the Space-Time Structure of Gradual Solar Energetic Particle Events? // *Space Science Reviews.* V. 219. A14. 2023. <https://doi.org/10.1007/s11214-023-00959-x>
- Reinard A.A., Biasecker D.A. Coronal mass ejection associated coronal dimmings // *Astrophys. J.* V. 674. P. 576–585. 2008. <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/525269>
- Richardson I.G. Energetic particles and corotating interaction regions in the solar wind // *Space Science Reviews.* V. 111. P. 267–376. 2004. <https://doi.org/10.1023/B:SPAC.0000032689.52830.3e>
- Richardson I.G. Solar wind stream interaction regions throughout the heliosphere // *Living Reviews in Solar Phys.* V. 15. A1. 2018. <https://doi.org/10.1007/s41116-017-0011-z>
- Shen C., Wang Y., Ye P., Wang S. Enhancement of Solar Energetic Particles During a Shock – Magnetic Cloud Interacting Complex Structure // *Solar Phys.* V. 252. P. 409–418. 2008. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11207-008-9268-7>
- Tan L.C., Malandraki O.E., Reames D.V., Ng C.K., Wang L., Dorrian G. Use of incident and reflected solar particle beams to trace the topology of magnetic clouds // *Astrophys. J.* V. 750. № 2. P. 146–167. 2012. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/750/2/146/meta>
- Torsti J., Riihonen E., Kocharov L. The 1998 May 2–3 magnetic cloud: an interplanetary “highway” for solar energetic particles observed with SOHO/ERNE // *Astrophys. J.* V. 600. P. L83–L86. 2004. <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/381575>
- Vlasova N.A., Bazilevskaya G.A., Ginzburg E.A., Daibog E.I., Kalegaev V.V., Kaportseva K.B., Logachev Yu.I., Myagkova I.N. Solar Energetic Proton Fluxes in Near-Earth Space on March 13–23, 2023 // *Cosmic Res.* V. 62. № 2. C. 197–209. 2024. <https://link.springer.com/article/10.1134/S0010952523600282>
- Vörös Z., Varsani A., Yordanova E., Sasunov Y.L., Roberts O.W., Kis A., Nakamura R., Narita Y. Magnetic reconnection within the boundary layer of a magnetic cloud in the solar wind // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* V. 126. № 9. e2021JA029415. 2021. <https://doi.org/10.1029/2021JA029415>
- Wu S.-S., Qin G. Magnetic Cloud and Sheath in the Ground-level Enhancement Event of 2000 July 14. I. Effects on the Solar Energetic Particles // *Astrophys. J.* V. 904. № 2. P. 151–159. 2020. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abc0f2>
- Zhang M., Cheng L., Zhang J., Riley P., Kwon R.Y., Lario D., Balmaceda L., Pogorelov N.V. 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 // *Astrophys. J.: Supplement Series.* V. 266. № 2. P. 35–54. 2023. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/acbb8e>



## **Influence of Processes on the Sun and in the Interplanetary Medium on the Solar Proton Event on March 30, 2022**

**N. A. Vlasova<sup>1,\*</sup>, G. A. Bazilevskaya<sup>2</sup>, E. A. Ginzburg<sup>3</sup>, E. I. Daibog<sup>1</sup>, V. V. Kalegaev<sup>1,4</sup>,  
K. B. Kaportseva<sup>1,4</sup>, Yu. I. Logachev<sup>1</sup>, I. N. Myagkova<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia*

*<sup>2</sup>Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*<sup>3</sup>Fedorov Institute of Applied Geophysics, Moscow, Russia*

*<sup>4</sup>Faculty of Physics of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

*\*e-mail: nav19iv@gmail.com*

The results of a comparative analysis of the solar proton event on March 30, 2022, which has an unusual time profile of solar proton fluxes, with the previous and subsequent solar proton events (March 28, 2022 and April 02, 2022) are presented. Increases in energetic proton fluxes in interplanetary and near-Earth space are associated with successive solar X-ray flares M4.0, X1.3 and M3.9 and three halo-type coronal mass ejections. The work was done based on experimental data obtained from spacecraft located in interplanetary space (ACE, WIND, STEREO A, DSCOVR), in a circular polar orbit at an altitude of 850 km (Meteor-M2) and in geostationary orbit (GOES-16, Electro-L2). An explanation has been proposed for the features of the energetic proton flux profile in the solar proton event on March 30, 2022: protons accelerated in the flare on March 30, 2022 were partially screened by an interplanetary coronal mass ejection, the source of which was the explosive processes on the Sun on March 28, 2022; late registration of maximum proton fluxes, simultaneous for particles of different energies, is due to the arrival of particle fluxes inside an interplanetary coronal mass ejection. The spatial distribution of solar protons in near-Earth orbit was similar to the distribution at the Lagrange point *LL*, but with a delay of ~50 min.

**Keywords:** solar proton event, solar flare, coronal mass ejection, solar wind, interplanetary magnetic field