

## ВЛИЯНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ВОЗМУЩЕНИЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ВАРИАЦИИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

© 2021 г. Н. С. Шлык<sup>1</sup>, \*, А. В. Белов<sup>1</sup>, М. А. Абунина<sup>1</sup>,  
Е. А. Ерошенко<sup>1</sup>, А. А. Абунин<sup>1</sup>, В. А. Оленева<sup>1</sup>, В. Г. Янке<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

\*e-mail: nshlyk@izmiran.ru

Поступила в редакцию 26.02.2021 г.

После доработки 20.04.2021 г.

Принята к публикации 27.05.2021 г.

На основе базы данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений, созданной в Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн, представлен анализ вариаций галактических космических лучей и изменения различных характеристик Форбуш-эффектов, связанных с влиянием на Землю взаимодействующих возмущений солнечного ветра (возмущения, временной интервал между регистрацией которых составляет менее 50 ч). Рассмотрены случаи парного взаимодействия высокоскоростных потоков из корональных дыр и корональных выбросов массы за 1995–2019 гг., приведен анализ поведения параметров солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и вариаций космических лучей для двух типов взаимодействующих возмущений солнечного ветра (взаимодействие следующих друг за другом корональных выбросов массы и взаимодействие коронального выброса массы с высокоскоростным потоком из корональной дыры). Установлено, что для первых из пары взаимодействующих событий уменьшаются средние времена наступления минимума Форбуш-эффекта и регистрации максимума скорости солнечного ветра и модуля индукции межпланетного магнитного поля, т.е. вторые события из пары не дают полностью развиться первым. Также установлено, что наличие взаимодействия обогащает второе событие за счет ресурсов первого, увеличивая его геомагнитную эффективность и степень модуляции космических лучей в сравнении с изолированными событиями.

DOI: 10.31857/S0016794021060134

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Форбуш-эффекты (ФЭ) – это изменения плотности и анизотропии космических лучей (КЛ) в крупномасштабных возмущениях солнечного ветра [Forbush, 1937; Belov, 2009]. Главными источниками Форбуш-эффектов являются высокоскоростные потоки из корональных дыр (КД), которые вращаясь вместе с Солнцем, создают рекуррентные ФЭ, и корональные выбросы массы (КВМ), создающие спорадические ФЭ [Parker, 1963; Lockwood, 1971; Cane, 2000; Belov, 2009]. При этом характеристики этих двух групп ФЭ значительно отличаются друг от друга, что описано во многих работах [Chertok et al., 2013; Abunina et al., 2016; Badruddin and Kumar, 2016; Melkumyan et al., 2018].

Стоит отметить, что нередки случаи, когда по мере распространения от Солнца к Земле потоки из корональных дыр и корональные выбросы массы взаимодействуют между собой, что по-раз-

ному сказывается на изменении параметров солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП). Взаимодействующие возмущения часто оказываются геоэффективными: вызывают значительные магнитные бури, оказывают влияние на распространение заряженных частиц, а также приводят к образованию более сложных условий для возникновения и развития ФЭ (см. ссылки ниже). Существует ряд работ, посвященных исследованию разных характеристик взаимодействий возмущений солнечного ветра. Так, исследование и обсуждение возможных источников и причин образования сложных взаимодействующих потоков в СВ приведено в работах [Behannon et al., 1991; Иванов, 1995, 1996; Burlaga et al., 2002, 2003; Lugaz et al., 2017]. В работе Gopalswamy et al. [2001] исследуется изменение характера длинноволновых радиосигналов при взаимодействии более и менее быстрых корональных выбросов массы. Увеличение индукции ММП и изменение характера поведения его Z-компонен-

ты (оказывающей наибольшее влияние на усиление геомагнитной активности) в случае взаимодействия КВМ описывается в работе [Farrugia and Berdichevsky, 2004]. Zhang et al. [2007], исследуя самые крупные геомагнитные бури за 1996–2005 гг., приходят к выводу о необходимости выделения взаимодействующих возмущений СВ в отдельный класс событий (24 из 88 рассмотренных) из-за особенностей развития геомагнитных возмущений.

Довольно много статей посвящено описанию и исследованию отдельных событий, связанных с взаимодействием КВМ в периоды высокой солнечной активности. Их различные проявления, особенности возникновения и распространения, последствия, регистрируемые в околоземном пространстве, подробно рассматриваются, например, следующими авторами: Berdichevsky et al. [1998]; Liu et al. [2011, 2012, 2014]; Harrison et al. [2012]; Wood et al. [2012]; Temmer et al. [2012]; Mishra et al. [2015]; Wu et al. [2016]; Srivastava et al. [2018] и другими. Эти работы содержат анализ данных спутников и коронографов, изменения параметров СВ и геомагнитной активности в конкретные дни регистрации множественных КВМ.

Немало исследователей изучают особенности взаимодействия корональных выбросов массы и высокоскоростных потоков из корональных дыр. Например, Gopalswamy et al. [2009] рассматривают влияние потоков из КД на КВМ в зависимости от их взаимного расположения на солнечном диске и приходят к выводу о снижении геоэффективности выбросов при таком взаимодействии. Mohamed et al. [2012] вводят особый параметр эффективности подобного воздействия (CHIP – *Coronal Hole Influence Parameter*) и утверждают, что потоки из КД способны значительно отклонять КВМ от линии распространения Солнце–Земля, уменьшая их геоэффективность. Аналогичные выводы получены и в работе Mäkelä et al. [2013]. Группа авторов Rodkin et al. [2016] рассматривают особенности изменения поведения и состава ионов СВ при взаимодействии КВМ и потоков из КД и приходят к выводу, что в подобных событиях ионные характеристики КВМ становятся более близки к тем, что присущи потокам из КД.

Однако, стоит отметить, что все вышеупомянутые работы или совсем не затрагивают вопросов об эффективности модуляции галактических космических лучей (ГКЛ) взаимодействующими возмущениями СВ, или приводят данные одного нейтронного монитора (как, например, в работе Burlaga et al. [2002]), свидетельствующие о некотором снижении скорости счета при прохождении таких возмущений мимо Земли. Таким образом, исследований, затрагивающих особенности возникновения и развития Форбуш-эффектов,

вызванных взаимодействующими возмущениями СВ, а также содержащих анализ большого количества подобных событий, пока нет.

Целью настоящей работы является изучение влияния взаимодействующих возмущений солнечного ветра на вариации ГКЛ и статистический анализ различных характеристик этих возмущений за период с 1995 по 2019 гг. на основе базы данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений (*Forbush Effects and Interplanetary Disturbances – FEID*, <http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html>), созданной в ИЗМИРАН.

## 2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Используемая база данных FEID помимо параметров КЛ, рассчитанных методом глобальной съемки [Belov et al., 2018] по данным мировой сети нейтронных мониторов (NMDB, <http://www01.nmdb.eu/>) для частиц с жесткостью 10 ГВ, также включает данные по различным параметрам солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Параметры СВ и ММП взяты из базы данных OMNI (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>), остальные параметры взяты с соответствующих сайтов: список ударных волн – (<http://isgi.unistra.fr/datadownload.php>), КВМ – (<https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CMEList/>), вспышек – (<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/>), корональных дыр – ([https://solen.info/solar/coronal\\_holes.html](https://solen.info/solar/coronal_holes.html)).

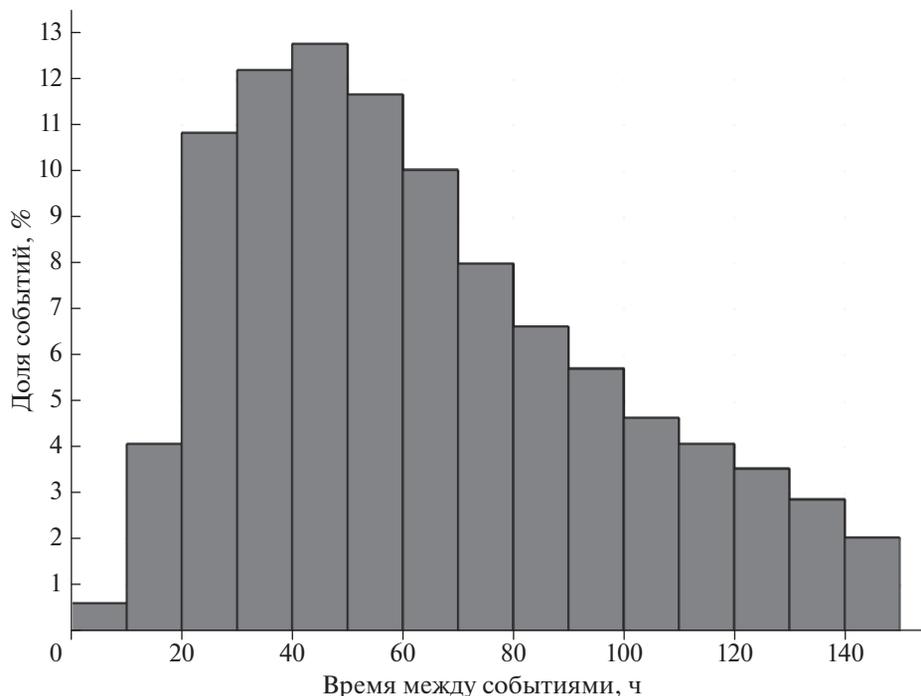
Из 7.5 тысяч событий, имеющихся в базе данных FEID в настоящее время, для данного исследования было отобрано 4 группы межпланетных возмущений:

1. Пары взаимодействующих корональных выбросов массы (ICME1 + ICME2).
2. Пары взаимодействующих коронального выброса массы и потока из корональной дыры (ICME + CH).
3. Изолированные корональные выбросы массы (ICME).
4. Изолированные потоки из корональных дыр (CH).

Третья и четвертая группы межпланетных возмущений используются в качестве контрольных групп для сравнения различных параметров. Более подробное описание условий определения каждой выборки и их характеристики приведены ниже.

## 3. ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Рассматриваемый период охватывает 1995–2019 гг., поскольку в эти годы накоплена наиболее полная информация по данным солнечного ветра и межпланетного магнитного поля.



**Рис. 1.** Распределение количества ФЭ по времени между событиями за 1995–2019 гг.: горизонтальная ось — время до регистрации следующего события в часах, вертикальная ось — доля событий в %.

За это время в базе данных FEID насчитывается 3006 Форбуш-эффектов. Несложные расчеты (отношение количества дней к количеству ФЭ составит  $9104/3006 = 3.03$ ) позволяют сделать вывод, что, в среднем, каждые три дня регистрируется новый ФЭ. Учитывая, что возмущения солнечного ветра иногда имеют длительность более трех дней, особенно если речь идет, например, о высокоскоростных потоках из корональных дыр, можно утверждать, что многие из регистрируемых на Земле возмущений солнечного ветра не являются изолированными, а оказывают воздействие друг на друга. Причем это воздействие может быть различным, в одном случае взаимодействующие события усиливают эффект от наложения (величина ММП во втором событии может оказаться больше ожидаемой, что впоследствии скажется на условиях развития ФЭ), в другом ослабляют его (второе событие не дает полностью развиваться первому, прекращая его раньше времени).

Гистограмма на рис. 1 отображает распределение общего количества зарегистрированных за указанный период времени ФЭ по времени между “соседними” выделенными событиями в вариациях космических лучей. Очевидно, что значительная часть событий (1125 из 3006) разделена промежутком времени менее 50 ч, при том, что наблюдаемые ФЭ зачастую имеют такую же или большую длительность. Это подтверждает предположение о существовании большого количе-

ства взаимодействующих событий, накладывающихся друг на друга.

Чтобы выделить пары взаимодействующих событий, мы отобрали события, время между началом которых составляет менее 50 ч. Анализ поведения параметров солнечного ветра и связи с возможными солнечными источниками позволил получить две разных выборки:

1. Пары взаимодействующих корональных выбросов массы (ICME1 + ICME2) — 181 пара.
2. Пары взаимодействующих коронального выброса массы и потока из корональной дыры (ICME + CH) — 186 пар.

Заметим, что среди событий, разделенных промежутком менее 50 ч, имеются и более сложные, например, серии из трех и более событий. Они не вошли в описанные выше выборки, поскольку в рамках данного исследования рассматриваются только парные взаимодействия. Также мы исключили соседние события, которые имеют другую последовательность (т.е. если КВМ следует за потоком из КД), в данной работе рассматриваются только случаи, когда КВМ регистрируется перед потоком из КД. Рассмотрение взаимодействий других видов является вопросом дальнейших исследований.

Для сравнения основных характеристик и создания контрольных групп, необходимо было выделить изолированные события (т.е. те, на развитие которых не оказывают влияния “соседние”

**Таблица 1.** Средние значения некоторых параметров солнечного ветра, космических лучей и геомагнитной активности для рассматриваемых групп событий

| Параметр/<br>Тип межпланетного<br>возмущения | ICME (+CH)      | CH (+ICME)      | ICME1           | ICME2           | CH              | ICME             |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| $AF$ , %                                     | $1.15 \pm 0.08$ | $1.12 \pm 0.05$ | $1.59 \pm 0.12$ | $2.01 \pm 0.16$ | $0.97 \pm 0.03$ | $2.15 \pm 0.15$  |
| $t_{\min}$ , ч                               | $13.0 \pm 0.9$  | $16.9 \pm 1.2$  | $12.9 \pm 1.0$  | $14.2 \pm 0.9$  | $25.8 \pm 1.0$  | $17.44 \pm 1.2$  |
| $A_{\text{хуmax}}$ , %                       | $1.16 \pm 0.03$ | $1.15 \pm 0.03$ | $1.45 \pm 0.04$ | $1.53 \pm 0.05$ | $1.01 \pm 0.02$ | $1.62 \pm 0.06$  |
| $B_{\text{max}}$ , нТл                       | $10.7 \pm 0.4$  | $12.0 \pm 0.3$  | $11.6 \pm 0.5$  | $14.5 \pm 0.6$  | $11.1 \pm 0.2$  | $13.3 \pm 0.6$   |
| $V_{\text{max}}$ , км/с                      | $429.0 \pm 6.3$ | $541.8 \pm 8.1$ | $459.1 \pm 8.0$ | $503.4 \pm 9.0$ | $566.6 \pm 7.5$ | $488.7 \pm 10.0$ |
| $V_{\text{mBm}}$                             | $2.34 \pm 0.10$ | $3.33 \pm 0.10$ | $2.93 \pm 0.21$ | $3.96 \pm 0.24$ | $3.32 \pm 0.10$ | $3.50 \pm 0.23$  |
| $tV_{\text{max}}$ , ч                        | $12.4 \pm 0.8$  | $27.0 \pm 1.3$  | $9.7 \pm 0.7$   | $13.8 \pm 1.1$  | $36.2 \pm 1.2$  | $14.3 \pm 1.3$   |
| $tB_{\text{max}}$ , ч                        | $15.7 \pm 0.8$  | $9.2 \pm 0.7$   | $11.9 \pm 0.8$  | $9.8 \pm 1.0$   | $16.6 \pm 1.0$  | $18.8 \pm 1.4$   |
| $t_{\text{хуmax}}$ , ч                       | $10.3 \pm 0.9$  | $18.7 \pm 1.1$  | $12.7 \pm 0.9$  | $16.5 \pm 1.1$  | $18.2 \pm 1.1$  | $16.5 \pm 1.1$   |
| $K_{\text{pmax}}$                            | $3.4 \pm 0.1$   | $4.0 \pm 0.1$   | $3.8 \pm 0.1$   | $4.5 \pm 0.1$   | $4.0 \pm 0.1$   | $4.2 \pm 0.1$    |
| $A_{\text{pmax}}$                            | $26.3 \pm 1.9$  | $33.8 \pm 1.9$  | $38.3 \pm 3.5$  | $55.6 \pm 4.4$  | $31.0 \pm 1.4$  | $45.6 \pm 4.0$   |
| $D_{\text{stmin}}$ , нТл                     | $-28.0 \pm 1.9$ | $-36.9 \pm 1.8$ | $-40.7 \pm 3.6$ | $-58.6 \pm 4.1$ | $-29.6 \pm 1.2$ | $-49.3 \pm 3.9$  |

возмущения солнечного ветра). Изолированными в данном исследовании считаются события, для которых разница во времени начала следующего и предыдущего события составляет более 50 ч. Учет поведения параметров солнечного ветра и связи с возможными солнечными источниками позволил выбрать две контрольные группы:

1. Изолированные (“чистые”) корональные выбросы массы (ICME) – 175 событий.

2. Изолированные (“чистые”) потоки из корональных дыр (CH) – 228 событий.

Уточним, что при выборе событий, входящих в контрольные группы, во-первых, особое внимание было уделено уверенному отождествлению наблюдаемого Форбуш-эффекта с солнечным источником, поскольку не все события, включенные в используемую базу данных, имеют точную привязку к событию на Солнце. Во-вторых, многие события не являются достаточно “чистыми”. Например, данные СВ и вариаций КЛ позволяют сделать предположение о том, что в потоке из КД наблюдаются признаки КВМ. Так, отличие параметров ФЭ, вызванных разными возмущениями СВ описано, например, в работах Chertok et al. [2013], Melkumyan et al. [2018]. Однако разделить КВМ и поток из КД на два отдельных события и рассматривать как пару следующих друг за другом возмущений СВ не всегда представляется возможным.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для каждой группы событий были рассчитаны средние значения различных параметров солнечного ветра, космических лучей и геомагнитной активности, в частности, максимальная скорость

СВ –  $V_{\text{max}}$ , максимальное значение ММП –  $B_{\text{max}}$  и время их регистрации ( $tV_{\text{max}}$  и  $tB_{\text{max}}$ ) от начала события, величина ФЭ –  $AF$ , время до минимума ФЭ –  $t_{\min}$ , максимальная анизотропия КЛ –  $A_{\text{хуmax}}$  и время ее регистрации от начала события –  $t_{\text{хуmax}}$ , максимальные значения геомагнитных индексов  $A_{\text{p}}$ ,  $K_{\text{p}}$ ,  $D_{\text{st}}$ . Полученные значения приведены в табл. 1. Каждый столбец при этом содержит данные для соседних событий в каждой группе возмущений в отдельности, а не характеристики комплексного события. Названия столбцов следует понимать следующим образом: ICME(+CH) – КВМ, за которыми следует поток из КД (группа ICME + CH); CH(+ICME) – потоки из КД, перед которыми регистрировались КВМ (группа ICME + CH); ICME1 – первые КВМ из взаимодействующей пары корональных выбросов массы; ICME2 – вторые КВМ из взаимодействующей пары корональных выбросов массы; ICME и CH – контрольные группы изолированных КВМ и потоков из КД.

На рисунках 2–5 приведены примеры типичных событий для каждой из четырех выделенных групп. На верхней панели указаны поведение скорости СВ ( $S_{\text{w}}$ ) и модуля индукции ММП ( $B$ ), на средней панели – изменение плотности КЛ ( $A_0$ ) и экваториальной составляющей векторной анизотропии КЛ ( $A_{\text{ху}}$ ), на нижней панели – изменение геомагнитных индексов  $D_{\text{st}}$  и  $K_{\text{p}}$ . Вертикальная линия – начало события (толстая светло-серая линия (SC) – момент регистрации ударной волны; тонкая темно-серая линия (ons) – начало события в случае отсутствия ударной волны, определяемое по резким изменениям основных параметров СВ). Легко заметить, что общий профиль изменения параметров солнечного ветра,

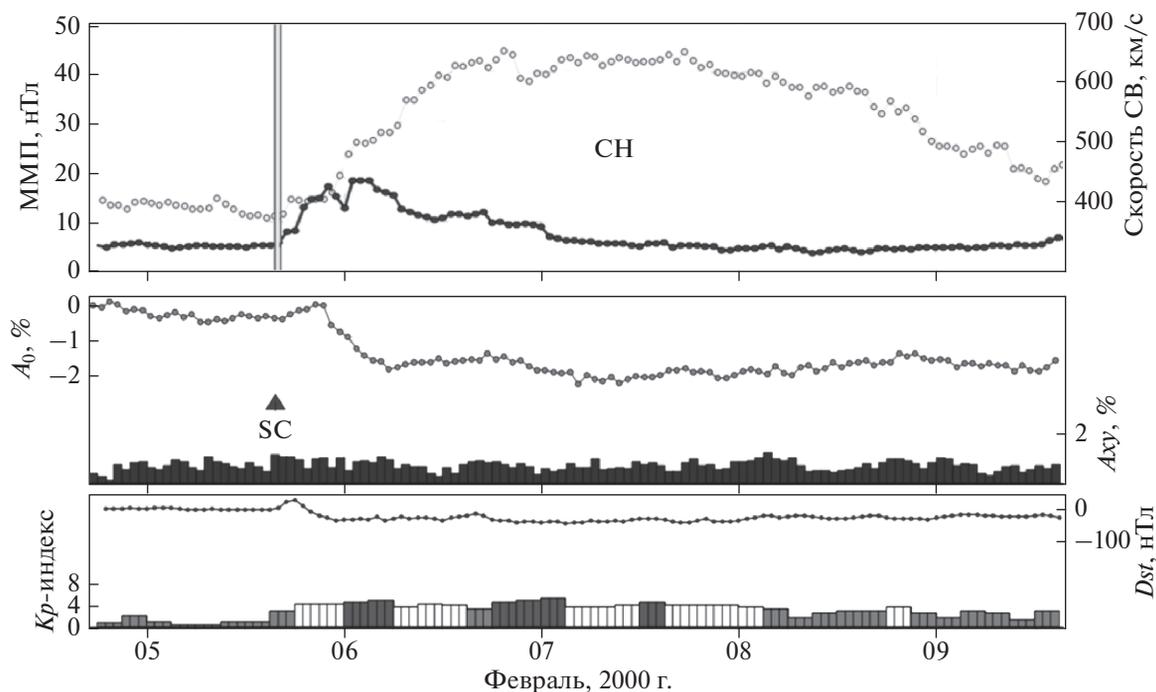


Рис. 2. Поведение основных параметров солнечного ветра, космических лучей и геомагнитной активности для потока из корональной дыры в феврале 2000 г. (пример события группы СН).

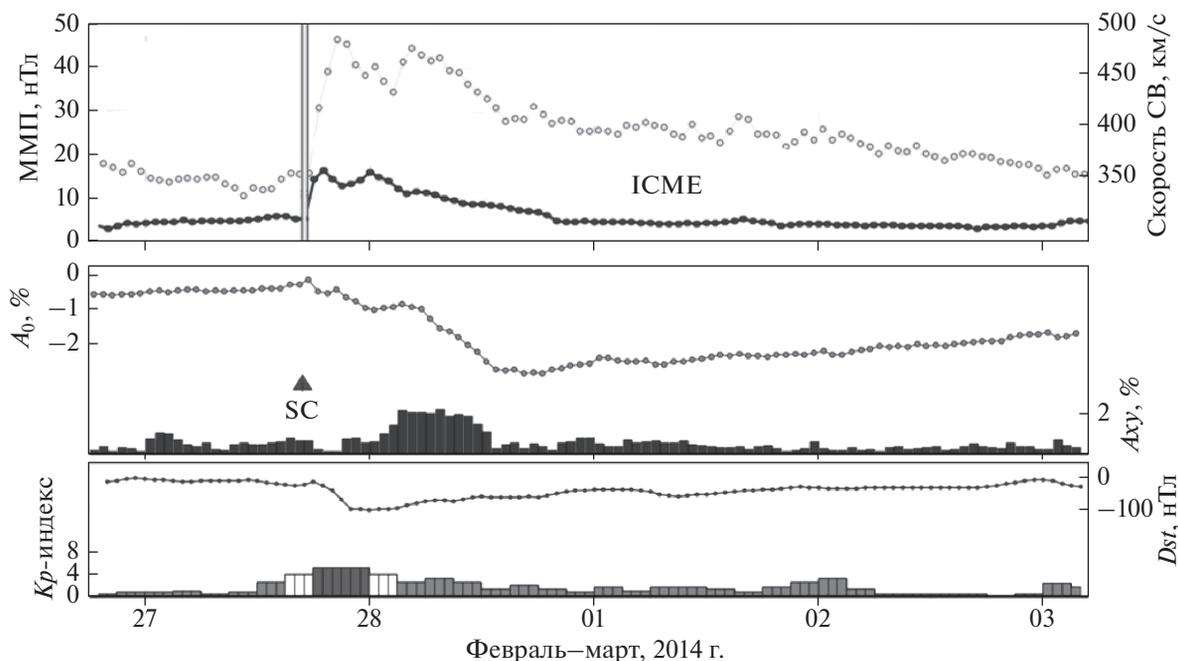
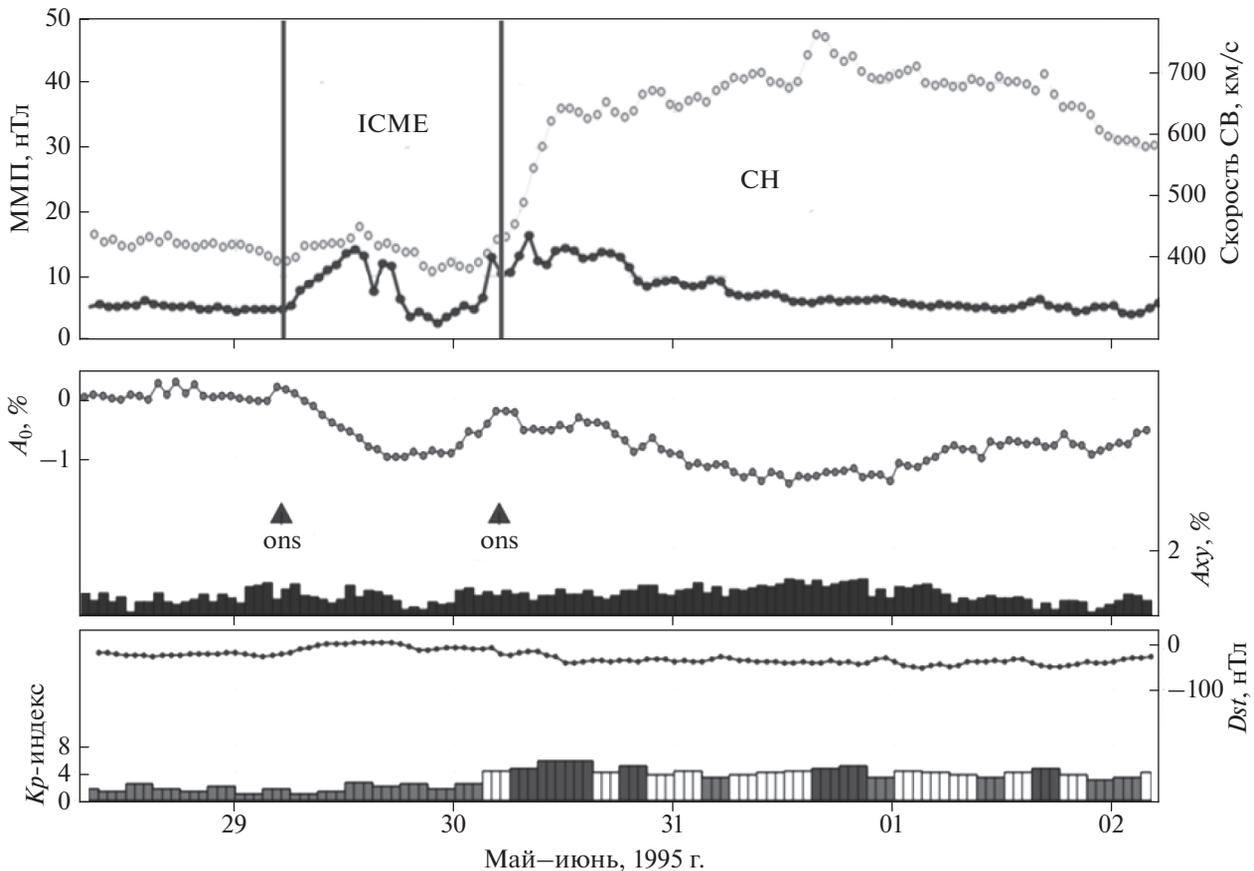


Рис. 3. Поведение основных параметров солнечного ветра, космических лучей и геомагнитной активности для коронального выброса массы в феврале–марте 2014 г. (пример события группы ICME).

космических лучей и геомагнитной активности значительно отличается для каждого случая.

Сначала рассмотрим поведение основных параметров СВ, ММП и КЛ в изолированных собы-

тиях. Регистрация на Земле высокоскоростных потоков из корональных дыр (рис. 2) и корональных выбросов массы (рис. 3) обычно связана со значительным ростом модуля индукции ММП



**Рис. 4.** Поведение основных параметров солнечного ветра, космических лучей и геомагнитной активности при взаимодействии коронального выброса массы и потока из корональной дыры в мае–июне 1995 г. (пример события группы ICME + CH).

(до 50 нТл для ICME и 24 нТл для CH в исследуемой выборке) и увеличением скорости СВ ( $V_{\max} = 1055$  и  $855$  км/с соответственно). Однако средние значения скорости СВ больше для группы CH ( $567$  км/с), чем для ICME ( $488$  км/с), и возмущенное состояние (интервалы, когда значения модуля индукции ММП  $> 8$  нТл и/или скорость СВ  $> 500$  км/с), соответственно, наблюдается дольше (иногда до 5–7 дней). При этом величина регистрируемых ФЭ, наоборот, больше для группы ICME (в среднем  $AF = 2.15$  и  $0.97\%$ ), также как и максимальные регистрируемые значения анизотропии КЛ ( $A_{х\max} = 4.85$  и  $2.67\%$  соответственно). С точки зрения геомагнитной эффективности группа ICME также превосходит группу CH, максимальные значения индексов геомагнитной активности в контрольных группах составили  $Dst_{\min} = -422$  и  $-119$  нТл,  $A_{p\max} = 300$  и  $132$  соответственно. Средние значения геомагнитных индексов для изолированных ICME и CH составляют  $Dst_{\min} = -44.9$  и  $-29.6$  нТл;  $A_{p\max} = 45.58$  и  $30.96$  соответственно.

Далее обратимся к анализу поведения основных параметров во взаимодействующих событи-

ях, поскольку их характеристики изменяются. Во-первых, для случаев взаимодействующих возмущений солнечного ветра (рис. 4 и рис. 5) наблюдается значительное сокращение времени развития первого события. Так, в среднем, время наступления минимума ФЭ для первого КВМ составляет  $t_{\min} = 13$  и  $12.9$  ч для пар ICME + CH и ICME1 + ICME2 соответственно. Тогда как для “чистых” выбросов из контрольной группы ICME это время почти в 1.5 раза больше и составляет  $17.4$  ч. Время достижения максимума скорости СВ ( $tV_{\max}$ ) и максимума модуля индукции ММП ( $tB_{\max}$ ) в ходе развития первого КВМ для всех взаимодействующих событий также меньше, чем для изолированных событий ICME. В частности, для ICME1 + ICME2 параметры  $tV_{\max}$  и  $tB_{\max}$  уменьшаются примерно в 1.2 раза, а для ICME + CH – в 1.5 и 1.6 раз соответственно.

Кроме того, данные из таблицы позволяют сделать вывод о том, что для первых КВМ из взаимодействующих пар средние величины ФЭ составляют  $AF = 1.15$  и  $1.59\%$  (для ICME + CH и ICME1 + ICME2 соответственно), что значитель-

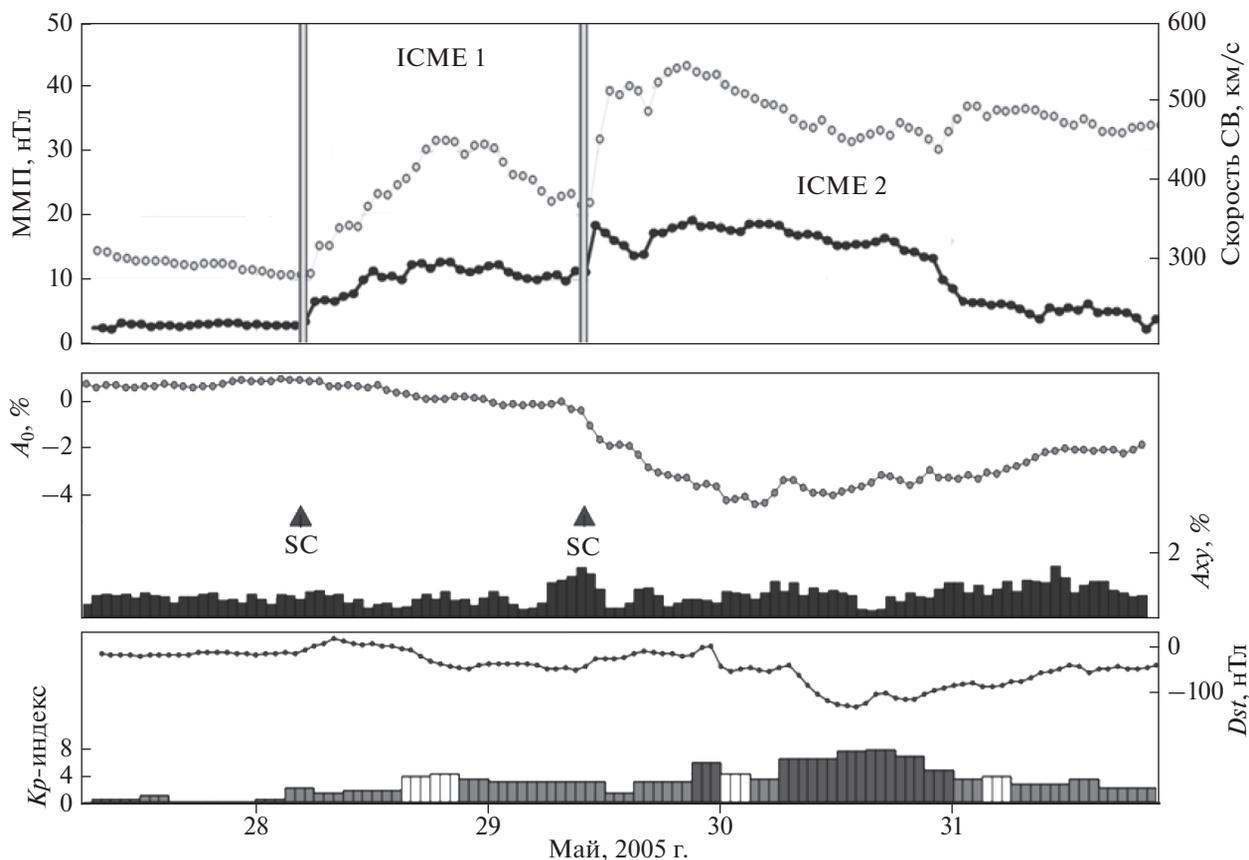


Рис. 5. Поведение основных параметров солнечного ветра, космических лучей и геомагнитной активности при взаимодействии корональных выбросов массы в мае 2005 г. (пример события группы ICME1 + ICME2).

но меньше, чем для контрольной группы ICME ( $AF = 2.15\%$ ).

Отличия для взаимодействующих и изолированных КВМ обнаружены и в средних значениях индексов геомагнитной активности. Для контрольной группы средняя величина  $Ap = 45.6$ , при этом для первого КВМ из взаимодействующих пар значения составляют  $Ap = 26.3$  и  $38.3$  (для ICME + CH и ICME1 + ICME2 соответственно), что в 1.7 и 1.2 раза меньше, чем для изолированных КВМ. Значения индекса  $Dst_{min}$  для событий с взаимодействием тоже меньше в 1.8 и 1.2 раза (для ICME + CH и ICME1 + ICME2 соответственно), чем в контрольной группе ICME.

Таким образом, все вышеперечисленное подтверждает предположение о том, что второе возмущение не дает полностью развиваться первому, подавляя его, причем это выражается не только во влиянии на вариации космических лучей (наблюдаемые ФЭ имеют меньшую амплитуду), но и изменении геомагнитной активности (снижается эффективность геомагнитных возмущений).

Характеристики вторых событий во взаимодействующих парах также подвержены изменениям в сравнении с контрольными группами. На-

пример, несколько увеличивается среднее значение величины ФЭ, создаваемого потоком из КД, взаимодействующим с КВМ, в сравнении с потоком из “чистой” дыры ( $AF = 1.12$  и  $0.97\%$  соответственно), а также сокращается время наступления минимума ФЭ примерно в 1.5 раза ( $t_{min} = 16.9$  ч против 25.8 ч). Аналогичным образом для взаимодействующего с КВМ потока из КД уменьшаются времена достижения максимальной скорости СВ и модуля ММП (в 1.3 и 1.8 раз соответственно, см. таблицу). При этом значения индексов геомагнитной активности и изменение экваториальной анизотропии КЛ остается в пределах погрешностей. Это позволяет сделать вывод о том, что влияние предыдущего КВМ на возмущения солнечного ветра, связанные с потоком из КД, проявляется, в основном, в сокращении длительности воздействия потока из КД на Землю.

Во взаимодействующих парах ICME1 + ICME2 для второго события также наблюдается сокращение времени наступления максимума индукции ММП и скорости СВ, регистрируется более быстрое развитие ФЭ в сравнении с контрольной группой ICME. Так, например, максимум индукции ММП достигается за 9.8 ч против 18.8 ч, а ми-

нимум ФЭ за 14.2 ч против 17.4 ч. Однако геомагнитная эффективность второго КВМ из взаимодействующей пары оказалась значительно выше, чем первого, и даже превысила средние значения геомагнитных индексов изолированных КВМ (см. таблицу):  $A_{pmax} = 55.6$ ;  $D_{stmin} = -58.6$  нТл. Это можно объяснить тем фактом, что вторые КВМ зачастую имеют большие скорости, догоняют первые ( $V_{max} = 503.4$  и  $459.1$  км/с соответственно), и большие значения индукции магнитного поля ( $B_{max} = 14.5$  и  $11.6$  нТл соответственно). Это приводит также и к росту величины регистрируемых ФЭ для вторых событий из взаимодействующей пары ICME1 + ICME2 до 2.01%, тогда как для первых событий она составляла 1.59%.

Можно заключить, что взаимодействующие возмущения солнечного ветра группы ICME1 + ICME2 оказывают большее влияние на вариации галактических КЛ по сравнению с группой ICME + CH, а также значительно усиливают геомагнитную активность.

Нами также был посчитан параметр  $VmVm$ , характеризующий возмущенность солнечного ветра и нормированный следующим образом:  $VmVm = V_{max}B_{max}/V_0B_0$ , где  $V_0$  и  $B_0$  – параметры невозмущенной межпланетной среды (обычно используются  $V_0 = 400$  км/с и  $B_0 = 5$  нТл). Анализ поведения данного параметра для разных групп событий позволил сделать следующие выводы: поток из КД оказывает значительное влияние на регистрируемый перед ним КВМ (поскольку значение  $VmVm$  уменьшается в 1.5 раза по сравнению с “чистым” ICME), а вот влияние КВМ на поток из КД, наоборот, совсем незначительное (значения  $VmVm$  равны с учетом ошибки для взаимодействующего потока из КД и изолированной КД). Для первых КВМ во взаимодействующей паре ICME1 + ICME2 этот параметр уменьшается (2.93 против 3.5 для контрольной группы ICME), а для вторых КВМ, наоборот, несколько увеличивается (3.96 против 3.5). Эти выводы также подтверждают вышеупомянутые заключения о том, что первые события во взаимодействующих парах оказываются менее эффективными, а вторые получают дополнительные “ресурсы”.

Также следует отметить изменение средних значений максимальной экваториальной анизотропии КЛ ( $A_{x_{max}}$ ) для разных групп событий. Для корональных выбросов массы эти значения уменьшились и составили 1.45 и 1.53% для взаимодействующей пары ICME1 + ICME2, а для КВМ, взаимодействующих с потоком из КД – 1.16% против 1.62% для “чистых” ICME. Однако, значения максимальной экваториальной анизотропии КЛ для потоков из КД, взаимодействующих с КВМ, наоборот, увеличились в сравнении с контрольной группой CH и составили 1.15% против 1.01%.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Взаимодействие различных возмущений солнечного ветра представляет собой типичную ситуацию и регистрируется довольно часто. При этом наблюдается большое разнообразие как в видах, так и степени взаимного влияния событий друг на друга. В рамках данной работы впервые на большом статистическом материале было проанализировано изменение параметров солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и галактических космических лучей для двух групп парных взаимодействующих возмущений солнечного ветра: взаимодействующих корональных выбросов массы (ICME1 + ICME2) и взаимодействующих корональных выбросов массы и потоков из корональных дыр (ICME + CH); а также произведено сравнение их характеристик с контрольными группами изолированных корональных выбросов массы (ICME) и изолированных потоков из корональных дыр (CH).

2. Подтвержден вывод о том, что космические лучи эффективнее модулируются корональными выбросами массы, чем потоками из корональных дыр. Кроме того, установлено, что максимальные значения величины Форбуш-эффекта, модуля индукции ММП и геомагнитных индексов наблюдаются для второго события из взаимодействующей пары ICME1 + ICME2. Отмечено также, что геомагнитная эффективность и степень модуляции космических лучей для корональных дыр, участвующих во взаимодействии, тоже увеличивается. Таким образом, можно утверждать, что наличие взаимодействия “обогащает” второе событие за счет ресурсов первого в любой взаимодействующей паре.

3. Впервые проанализировано поведение некоторых временных параметров Форбуш-эффектов для взаимодействующих событий. Установлено, что во всех рассмотренных взаимодействующих событиях средние времена наступления минимума Форбуш-эффекта, а также максимума скорости солнечного ветра и модуля индукции межпланетного магнитного поля значительно меньше, чем для изолированных событий, т.е. вторые события из пары не дают полностью развиться первым, “обрезают” их.

4. Схожий эффект изменения временных параметров отмечается и для вторых событий из пары. Вторые события во взаимодействующих парах ICME1 + ICME2 и ICME + CH имеют временной сдвиг в сторону уменьшения времени развития события: наступление максимума скорости солнечного ветра, модуля индукции межпланетного магнитного поля и минимума Форбуш-эффекта происходит раньше, чем в событиях соответствующих контрольных групп.

## 5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны коллективам мировой сети станций космических лучей, обеспечивающим данные непрерывной регистрации нейтронной компоненты: ([http://cr0.izmiran.ru/ThankYou/Our\\_Acknowledgment.pdf](http://cr0.izmiran.ru/ThankYou/Our_Acknowledgment.pdf)); благодарим базу данных NMDB ([www.nmdb.eu](http://www.nmdb.eu)). Работа базируется на экспериментальных данных УНУ “Российская национальная сеть станций космических лучей”.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Абунина М.А. и Белов А.В. поддержаны Российским научным фондом, грант № 20-72-10023. Абунин А.А. поддержан Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 18-52-34004.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Иванов К.Г.* Солнечные источники межпланетных ударных волн // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 35. № 3. С. 24–31. 1995.
- *Иванов К.Г.* Солнечные источники потоков межпланетной плазмы на орбите Земли // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 36. № 2. С. 19–27. 1996.
- *Abunina M., Abunin A., Belov A., Eroshenko E., Gaidash S., Oleneva V., Yanke V., Kryakunova O.* On the influence of the coronal hole latitude and polarity on the geomagnetic activity and cosmic ray variations / Proc. 34th ICRC, Den Haag, Netherlands, 30 July–6 August, 2015. id 082. 2016.
- *Badruddin, Kumar A.* Study of the cosmic-ray modulation during the passage of ICMEs and CIRs // Solar Phys. V. 291. № 2. P. 559–580. 2016. <https://doi.org/10.1007/s11207-015-0843-4>
- *Behannon K.W., Burlaga L.F., Hewish A.* Structure and evolution of compound streams at less than or equal to 1 AU // J. Geophys. Res. V. 96. P. 21 213–21 225. 1991. <https://doi.org/10.1029/91JA02267>
- *Belov A.V.* Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena / Proc. IAU Symposium. V. 257. P. 439–450. <https://doi.org/10.1017/S1743921309029676>. 2009.
- *Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Oleneva V., Abunin A., Abunina M., Papaioannou A., Mavromichalaki H.* The Global Survey Method applied to ground-level cosmic ray measurements // Solar Phys. V. 293. № 68. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11207-018-1277-6>
- *Berdichevsky D., Bougeret J.-L., Delaboudinière J.-P. et al.* Evidence for multiple ejecta: April 7–11, 1997 ISTP Sun-Earth connection event // Geophys. Res. Lett. V. 25. № 14. P. 2473–2476. 1998. <https://doi.org/10.1029/97GL03771>
- *Burlaga L.F., Plunkett S.P., St. Cyr O.C.* Successive CMEs and complex ejecta // J. Geophys. Res. V. 107. № A10. P. SSH 1-1-SSH 1-12. 2002. <https://doi.org/10.1029/2001JA000255>
- *Burlaga L., Berdichevsky D., Gopalswamy N., Lepping R., Zurbuchen T.* Merged interaction regions at 1 AU // J. Geophys. Res. V. 108. № A12. P. SSH 2-1-SSH 2-12. 2003. <https://doi.org/10.1029/2003JA010088>
- *Cane H.V.* Coronal Mass Ejections and Forbush Decreases // Space Sci. Rev. V. 93. P. 55–77. 2000. <https://doi.org/10.1023/A:1026532125747>
- *Chertok I.M., Abunin A.A., Belov A.V., Grechnev V.V.* Magnetic flux of EUV arcade and dimming regions as a relevant parameter for early diagnostics of solar eruptions – sources of non-recurrent geomagnetic storms and Forbush decreases // Solar Phys. V. 282. P. 175–199. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11207-012-0127-1>
- *Farrugia C.J., Berdichevsky D.B.* Evolutionary signatures in complex ejecta and their driven shocks // Ann. Geophysicae. V. 22. № 10. P. 3679–3698. 2004. <https://doi.org/10.5194/angeo-22-3679-2004>
- *Forbush S.E.* On the effects in cosmic-ray intensity observed during the recent magnetic storm // Phys. Rev. V. 51. P. 1108–1109. 1937. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.51.1108.3>
- *Gopalswamy N., Mäkelä P., Xie H., Akiyama S., Yashiro S.* CME interactions with coronal holes and their interplanetary consequences // J. Geophys. Res. V. 114. P. A00–A22. 2009. <https://doi.org/10.1029/2008JA013686>
- *Gopalswamy N., Yashiro S., Kaiser M.L., Howard R.A., Bougeret J.L.* Radio signatures of coronal mass ejection interaction: Coronal mass ejection cannibalism? // Astrophys. J. V. 548. № 1. P. L91–L94. 2001. <https://doi.org/10.1086/318939>
- *Harrison R.A., Davies J.A., Möstl C. et al.* An analysis of the origin and propagation of the multiple coronal mass ejections of 2010 August 1 // Astrophys. J. V. 750. № 45. 2012. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/750/1/45>
- *Liu Y., Luhmann J.G., Bale S.D., Lin R.P.* Solar source and heliospheric consequences of the 2010 April 3 coronal mass ejection: a comprehensive view // Astrophys. J. V. 734. № 84. 2011. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/734/2/84>
- *Liu Y.D., Luhmann J.G., Möstl C., Martínez-Oliveros J.C., Bale S.D., Lin R.P., Harrison R.A., Temmer M., Webb D.F., Odstroil D.* Interactions between coronal mass ejections viewed in coordinated imaging and in situ observations // Astrophys. J. Lett. V. 746. № L15. 2012. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/746/2/L15>
- *Liu Y.D., Yang Z., Wang R., Luhmann J.G., Richardson J.D., Lugaz N.* Sun-to-Earth characteristics of two coronal mass ejections interacting near 1 AU: formation of a complex ejecta and generation of a two-step geomagnetic storm 2014 // Astrophys. J. Lett. V. 793. № L41. 2014. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/793/2/L41>
- *Lockwood J.A.* Forbush decreases in the cosmic radiation // Space Sci. Rev. V. 12. № 5. P. 658–715. 1971.
- *Lugaz N., Temmer M., Wang Y., Farrugia C.J.* The Interaction of successive Coronal Mass Ejections: a review // Solar Phys. V. 292. № 64. 2017. <https://doi.org/10.1007/s11207-017-1091-6>
- *Mäkelä P., Gopalswamy N., Xie H., Mohamed A. A., Akiyama S., Yashiro S.* Coronal hole influence on the observed structure of interplanetary CMEs // Solar Phys. V. 284. P. 59–75. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11207-012-0211-6>
- *Melkumyan A.A., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A., Eroshenko E.A., Oleneva V.A., Yanke V.G.* Main properties of

- Forbush Effects related to high-speed streams from coronal holes // *Geomagn. Aeronomy* V. 58. № 2. P. 154–168. 2018.  
<https://doi.org/10.1134/S0016793218020159>
- *Mishra W., Srivastava N., Chakrabarty D.* Evolution and consequences of Interacting CMEs of 9–10 November 2012 using STEREO/SECCHI and in situ observations // *Solar Phys.* V. 290. P. 527–552. 2015.  
<https://doi.org/10.1007/s11207-014-0625-4>
- *Mohamed A.A., Gopalswamy N., Yashiro S., Akiyama S., Mäkelä P., Xie H., Jung H.* The relation between coronal holes and coronal mass ejections during the rise, maximum, and declining phases of Solar Cycle 23 // *J. Geophys. Res.* V. 117. № A01103. 2012.  
<https://doi.org/10.1029/2011JA016589>
- *Parker E.N.* *Interplanetary Dynamical Processes.* New York: Interscience, 284 p. 1963.
- *Rodkin D.G., Shugay Y.S., Slemzin I.S., Veselovsky V.A.* Interaction of high-speed and transient fluxes of solar wind at the maximum of solar cycle 24 // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* V. 43. I. 9. P. 287–290. 2016.  
<https://doi.org/10.3103/S1068335616090062>
- *Srivastava N., Mishra W., Chakrabarty D.* Interplanetary and geomagnetic consequences of interacting CMEs of 13–14 June 2012 // *Solar Phys.* V. 293. № 5. 2018.  
<https://doi.org/10.1007/s11207-017-1227-8>
- *Temmer M., Bojan V., Tanja R. et al.* Characteristics of kinematics of a Coronal Mass Ejection during the 2010 August 1 CME–CME interaction event 2012 // *Astrophys. J.* V. 749. № 1. P. 57. 2012.  
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/749/1/57>
- *Wood B.E., Wu C.-C., Rouillard A.P., Howard R.A., Socker D.G.* A Coronal Hole’s effects on coronal mass ejection shock morphology in the inner heliosphere // *Astrophys. J.* V. 755. № 1. 2012.  
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/755/1/43>
- *Wu C.C., Liou K., Socker D.G., Howard R., Jackson B.V., Yu H.S., Hutting L., Plunkett S.P.* The first super geomagnetic storm of solar cycle 24: “The St. Patrick’s day event (17 March 2015)” // *Earth Planet Sp.* V. 68. № 151. 2016.  
<https://doi.org/10.1186/s40623-016-0525-y>
- *Zhang J., Richardson I.G., Webb D.F. et al.* Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ( $Dst \leq -100$  nT) during 1996–2005 // *J. Geophys. Res.* V. 112. № A10102. 2007.  
<https://doi.org/10.1029/2007JA012321>