ГЕОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ВОЗМУЩЕНИЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А.

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия*

GEOEFFECTIVENESS OF PAIRED INTERACTING SOLAR WIND DISTURBANCES

Shlyk N.S., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A.

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation
Russian Academy of Sciences, IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia*

We conduct an analysis of variations in galactic cosmic rays and changes in various characteristics of the interplanetary medium associated with the influence of interacting solar wind disturbances on the Earth using the database of Forbush effects and interplanetary disturbances. Cases of pair interaction of high-speed streams from coronal holes and interplanetary coronal mass ejections are considered for the period from 1995 to 2020, including the analysis of the parameters of the solar wind, interplanetary magnetic field, cosmic rays variations and geomagnetic activity for three types of interacting solar wind disturbances and comparison with control groups of isolated events. It was found that interacting solar wind disturbances enhance the superposition effect for the second event from the pair (the magnitude of the interplanetary magnetic field and the solar wind speed turns out to be higher than expected), and the first event turns out to be less effective (the second event prevents the first from fully developing).

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-317-320

Введение

Различные солнечные события (корональные выбросы массы, вспышки, высокоскоростные потоки из корональных дыр) оказывают влияние на состояние магнитосферы Земли, а также вызывают изменения потока космических лучей (КЛ), регистрируемых на Земле сетью нейтронных мониторов. Однако часто бывает сложно с уверенностью идентифицировать источник межпланетного возмущения, поскольку по мере распространения от Солнца к Земле потоки из корональных дыр (КД) и корональные выбросы массы (КВМ) могут взаимодействовать между собой. Существует ряд работ, посвященных исследованию различных характеристик подобных взаимодействий возмущений солнечного ветра (СВ). Авторы рассматривали причины и источники комплексных межпланетных возмущений [1–4], изменение некоторых характеристик в результате их взаимного влияния [5–7], проявление в околоземном космическом пространстве отдельно взятых взаимодействующих событий [8–10]. Однако вопрос о геоэффективности событий, вызванных различными комбинациями возмущений СВ всё ещё остается открытым. Ранее не составлялся каталог и не проводился ста-

статистический анализ большого количества подобных событий. В этой связи целью настоящей работы является выделение и описание групп парных взаимодействующих возмущений солнечного ветра, а также статистический анализ их различных характеристик за период с 1995 по 2020 гг. на основе базы данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений (Forbush Effects and Interplanetary Disturbances – FEID [12]), созданной в ИЗМИРАН.

Данные и методы

Используемая база данных FEID содержит в себе параметры КЛ, рассчитанные методом глобальной съемки [11] по данным мировой сети нейтронных мониторов [13] для частиц с жесткостью 10 ГВ. Также нами были использованы параметры СВ и межпланетного магнитного поля (ММП), взятые из базы данных OMNI [14] и прочие сопутствующие сведения: данные по геомагнитной активности [15, 16], список ударных волн [17], KBM [18], вспышек [19], КД [20].

Для исследования было отобрано 5 групп межпланетных возмущений:

1. Пары взаимодействующих KBM (ICME1+ICME2) – 142 пары.
2. Пары взаимодействующих KBM и потока из КД (ICME+HSS) – 201 пара.
3. Пары взаимодействующих потоков из КД (HSS1+HSS2) – 55 пар.
4. Изолированные KBM (ICME) – 232 события.
5. Изолированные потоки из КД (HSS) – 221 событие.

События, разделенные промежутком времени менее 50 ч, признаны взаимодействующими и вошли в первые две группы. Для третьей группы временной промежуток был увеличен до 120 ч из-за длительности возмущения. События в 4 и 5 группе разделены промежутком времени более 50 ч, считаются не оказывающими друг на друга влияния, составляют контрольные группы и используются для сравнения.

Результаты и обсуждение

На рисунке приведены примеры типичных взаимодействующих событий из каждой группы. На верхней панели каждого рисунка указаны поведение скорости СВ (SW) и модуля индукции ММП (IMF), на средней панели – изменение плотности КЛ (A_0) и экваториальной составляющей векторной анизотропии КЛ (A_{xy}), на нижней панели – изменение геомагнитных индексов Dst и Kp. Вертикальная линия – начало события (светло-серая линия (SC) – момент регистрации ударной волны; темно-серая линия (ons) – начало события в случае отсутствия ударной волны, определяемое по резким изменениям основных параметров СВ, ММП или КЛ). Профили поведения различных параметров имеют значительные отличия в каждом случае.

С целью количественного описания для каждой группы событий были рассчитаны средние значения различных параметров СВ, КЛ и геомагнит-

ной активности, в частности: максимальные скорость СВ ($V_{\max}$) и индукция ММП ($B_{\max}$) и время их регистрации от начала события ($tV_{\max}$, $tB_{\max}$), величина максимального снижения плотности КЛ (AF), время до достижения минимума плотности КЛ ($t_{\min}$), максимальная анизотропия КЛ ($A_{\text{ху}}_{\max}$) и время ее регистрации от начала события ($tA_{\text{ху}}_{\max}$), максимальные значения геомагнитных индексов Kp , Ap , Dst . Полученные данные приведены в таблице.

Рисунок. Примеры взаимодействующих событий:

а – группа ICME1+ICME2;

б – группа ICME+HSS;

в – группа HSS1+HSS2.

Таблица.

Параметр	ICME (+HSS)	HSS (+ICME)	ICME1	ICME2	HSS1	HSS2	ICME	HSS
AF , %	0.9 ± 0.07	1.0 ± 0.04	1.3 ± 0.13	1.9 ± 0.17	0.9 ± 0.06	0.8 ± 0.05	1.7 ± 0.11	0.8 ± 0.02
$t_{\min}$, ч	14.8 ± 0.81	19.3 ± 1.2	13.4 ± 0.92	16.4 ± 1.09	12.8 ± 2.48	9.3 ± 2.29	19.3 ± 0.97	23.2 ± 0.78
$A_{\text{ху}}_{\max}$, %	1.1 ± 0.03	1.1 ± 0.03	1.4 ± 0.05	1.5 ± 0.06	0.95 ± 0.03	0.9 ± 0.04	1.4 ± 0.05	1 ± 0.01
$tA_{\text{ху}}_{\max}$, ч	11.9 ± 0.92	21.3 ± 1.04	13.8 ± 1.14	17.5 ± 1.23	17.6 ± 2.51	17.5 ± 2.42	17.2 ± 1.0	19.2 ± 0.84
$B_{\max}$, нТл	10.5 ± 0.33	11.9 ± 0.24	11.2 ± 0.52	14.5 ± 0.6	11.2 ± 0.5	8.95 ± 0.44	12.1 ± 0.44	10.8 ± 0.19
$tB_{\max}$, ч	16.1 ± 0.83	9.1 ± 0.66	13.4 ± 0.96	11.3 ± 1.15	14.6 ± 2.15	8.7 ± 2.02	20.3 ± 1.23	12 ± 0.64
$V_{\max}$, км/с	430 ± 6.1	556 ± 7.9	456 ± 8.9	488 ± 9.9	549 ± 16.5	577 ± 18.2	476 ± 8.0	570 ± 5.8
$tV_{\max}$, ч	13.3 ± 0.82	28.9 ± 1.23	9.3 ± 0.75	14.9 ± 1.31	28.6 ± 2.34	24.3 ± 2.67	17.3 ± 1.19	30 ± 0.98
$Kp_{\max}$	3.4 ± 0.11	4.1 ± 0.10	3.8 ± 0.14	4.2 ± 0.14	3.95 ± 0.16	3.8 ± 0.19	4 ± 0.10	3.9 ± 0.07
$Ap_{\max}$	26.5 ± 2.14	35.8 ± 1.86	35.3 ± 3.37	45.5 ± 4.19	30.3 ± 2.87	29.4 ± 3.35	39.1 ± 3.02	30.8 ± 1.16
$Dst_{\min}$, нТл	-27.6 ± 2.0	-37.9 ± 1.7	-39.3 ± 3.3	-51.8 ± 3.7	-30.1 ± 2.5	-28 ± 2.7	-42.9 ± 2.9	-28.5 ± 1.0

Выводы

Проведенный анализ и сравнение позволяют заключить следующее:

- Геоэффективность КВМ больше, чем высокоскоростных потоков из КД, что подтверждает результаты предыдущих исследований. При этом

усредненные максимальные значения модуля индукции ММП, геомагнитных индексов и вариаций плотности КЛ, наблюдаются для второго события из взаимодействующей пары ICME1+ICME2.

- Геомагнитная эффективность и степень модуляции космических лучей для потоков из КД, следующих за KBM (группа ICME+HSS), также увеличивается. Таким образом, можно утверждать, что наличие взаимодействия «обогащает» второе событие за счет ресурсов первого в любой взаимодействующей паре.

- Исключением являются следующие друг за другом потоки из КД (группа HSS1+HSS2), для которых подобного влияния не обнаружено. Геоэффективность высокоскоростных потоков из КД, следующих друг за другом, практически не отличается от контрольной группы HSS.

- Также установлено, что во взаимодействующих событиях с участием KBM средние времена наступления минимума плотности КЛ, а также времена регистрации максимума скорости СВ и модуля индукции ММП значительно меньше, чем для изолированных событий, т.е. вторые события из пары не дают полностью развиваться первым, «обрезают» их. Но и вторые события во всех взаимодействующих парах также имеют временной сдвиг в сторону ускорения развития события.

Все вышеперечисленные выводы могут быть полезны для прогнозирования изменения состояния космической погоды и/или моделирования поведения космических лучей.

Финансирование

М.А. Абунина, А.А. Абунин, А.В. Белов, Н.С. Шлык поддержаны Грантом РФФИ № 20-72-10023.

Литература

1. Иванов К.Г. // ГиА. 1995. Т. 35. № 3. С. 24–31.
2. Behannon K.W. et al. // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. P. 21213–21225.
3. Burlaga L. F. et al. // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. N A10. P. SSH 1-1-SSH 1-12.
4. Lugaz N., Temmer M., Wang Y., Farrugia C.J. // Solar Phys. 2017.V. 292. N 64.
5. Gopalswamy N. et al. // J. Geophys. Res. V.114. P.A00–A22. 2009.
6. Farrugia C. J., Berdichevsky D. B. // Ann. Geophys. 2004. V. 22. N 10. P. 3679–3698.
7. Zhang J. et al. // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. N A10102.
8. Temmer M. et al. // Astrophys. J. 2012.V.749. N 1. P. 57.
9. Liu Y.D. et al. // Astrophys. J. Lett. 2014. V. 793. N L41.
10. Srivastava N., Mishra W., Chakrabarty D. // Solar Phys. 2018. V. 293. N 5.
11. Belov A. et al. // Solar Phys. 2018. V. 293. P.68-91.
12. <http://spaceweather.izmiran.ru/rus/dbs.html>
13. <http://www01.nmdb.eu/>
14. <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>
15. <ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/obs/kp-ap/wdc/>
16. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/index.html>
17. <http://isgi.unistra.fr/data/download.php>
18. https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/
19. <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/events/>
20. http://www.solen.info/solar/coronal_holes.html