

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ КОРОНАЛЬНЫМИ ВЫБРОСАМИ МАССЫ ТИПА ГАЛО И ВСПЫШКАМИ НА СОЛНЦЕ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В 23-м И 24-м ЦИКЛАХ

Е.А.БРУЕВИЧ^{1,2}, В.А.БУРОВ², А.С.АРАКЕЛОВ², Ю.П.ОЧЕЛКОВ²

Поступила 16 июня 2020

Принята к печати 23 декабря 2020

Проведен анализ активности Солнца взрывного характера в 23-м и 24-м циклах. Использовались данные спутниковых наблюдений рентгеновского излучения GOES-15 во вспышках и наблюдения выбросов корональной массы (СМЕ) на коронографе SOHO/LASCO. Были проанализированы интервалы задержки между началом вспышки и началом СМЕ типа Гало, связанных одной и той же активной областью. Показано, что временной интервал между началом вспышки и началом СМЕ в среднем в 2 раза меньше для вспышек классов $\geq X1$, чем для менее мощных вспышек. Отдельно были рассмотрены все события, которые сопровождалась мощными вспышками классов $\geq X1$. Проведена оценка взаимосвязи СМЕ типа Гало и индексов геомагнитной активности K_p и Dst , используемых для прогнозирования космической погоды. Показано, что вероятность опасной магнитной бури на Земле с $K_p \geq 7$ составляет более 80%, если одновременно выполняются два условия: $V_{СМЕ} \geq 1000$ км/с и $|Dst| \geq 100$ нТ.

Ключевые слова: *Солнце: 23-й и 24-й циклы: вспышки: вспышки в мягком рентгеновском диапазоне: СМЕ типа Гало: индексы геомагнитной активности*

1. *Введение.* Переменность потоков солнечного излучения и плазмы, определяющая космическую погоду, связана с непрерывно меняющимся магнитным полем Солнца. Силовые линии магнитного поля изменяются и запутываются в результате воздействия дифференциального вращения Солнца на всплывающие конвективные потоки плазмы. Распределение магнитных полей на поверхности Солнца сильно неоднородно: жгуты силовых линий поля в пятнах характеризуются напряженностью в сотни нТ, при средней напряженности глобального магнитного поля в 0.1-1 нТ. В разреженной плазме короны эти локальные магнитные поля замыкаются, формируя дуги силовых линий. Потеря равновесия в сложных конфигурациях поля над пятнами влечет за собой события взрывного характера - солнечные вспышки, солнечные протонные события (Solar Proton Events - SPE) и корональные выбросы массы (Coronal Mass Ejection - CME), сопровождающиеся высвобождением большого количества энергии. В ходе SPE,

сопровождающих самые мощные вспышки, генерируются нетепловые протоны и другие частицы - солнечные космические лучи. СМЕ характеризуются выбросом в солнечный ветер большого количества солнечной плазмы и магнитного поля. Согласно [1,2], наиболее мощные эруптивные события сопровождаются всеми этими проявлениями. В настоящее время не до конца ясно, насколько тесно вспышки, SPE и СМЕ взаимосвязаны. Например, небольшая часть СМЕ (как будет показано ниже ~5-8% для СМЕ типа Гало) происходит вне активных областей и связана с протуберанцами, теряющими стабильность [3,4]. СМЕ являются наиболее мощными проявлениями солнечной активности. Они представляют собой распространяющиеся от Солнца крупномасштабные магнитоплазменные структуры, которые часто имеют форму магнитной петли, расширяющейся при удалении от Солнца. Магнитные облака, связанные с СМЕ, распространяются на фоне спокойного (невозмущенного) солнечного ветра со скоростями до 2500 км/с и имеют сильное и упорядоченное магнитное поле в десятки нТ. Если скорость СМЕ превышает скорость основного потока солнечного ветра на локальную скорость звука, то перед корональным выбросом образуется ударная волна, за которой магнитное поле усилено сжатием. Именно такие образования вызывают самые мощные бури [5].

2. Вспышки и СМЕ. Согласно последним исследованиям, посвященным СМЕ (см., например, [6]), мощные события, наиболее вероятно связанные с магнитными бурями, относятся к СМЕ типа Гало и составляют примерно 5% от общего числа СМЕ. СМЕ типа Гало имеют наивысшие значения массы и энергии. Этот тип СМЕ является относительно редким из-за добавочного требования особой ориентации вектора магнитного момента. И в то же время именно этот тип СМЕ оказывает наибольшее воздействие на космическую погоду. Как известно, именно СМЕ (а не вспышки) возбуждают межпланетные возмущения, а затем и магнитные бури (см., например, [7]). При этом вспышки могут быть использованы исследователями и прогнозистами как индикаторы солнечной активности, связанные с СМЕ и межпланетными возмущениями. СМЕ типа Гало имеют различный характер в минимуме и в максимуме солнечной активности, поэтому для наиболее полного статистического анализа в данной работе изучены все события данного типа для 23-го и 24-го циклов из каталога [8].

Рассмотрим, как связаны СМЕ и вспышки на примере события 03.11.2011. На рис.1 представлен поток от вспышки 03.11.2011 мощностью X1.9 в диапазоне 0.1-0.8 нм по данным GOES-15. Отмечено начало вспышки в 21:18.

Видно, что вспышка и СМЕ начались почти одновременно. Также наблюдалось небольшое SPE-событие, вызванное вспышкой (3.6 pfu в диапазоне

>10 MeV) и слабое возмущение магнитного поля через 1.5 дня (Disturbances storm-time/Dst ~ -40 nT). Геоэффективность этого события невелика в результате того, что активная область, которая сгенерировала вспышку и СМЕ, находилась в восточной части лимба (N22E63).

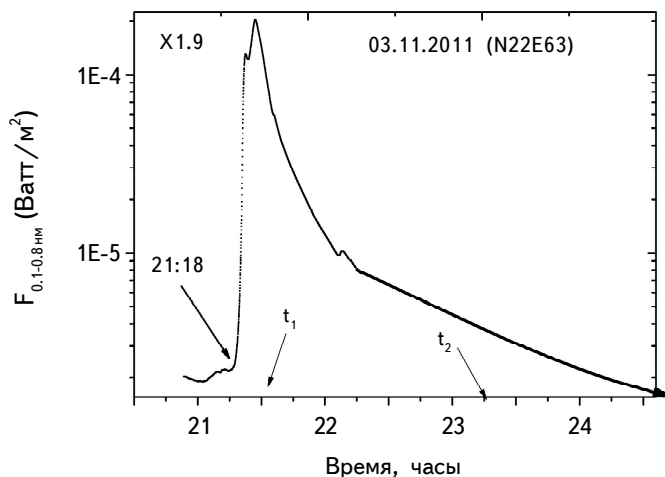


Рис.1. Поток излучения от вспышки 03.11.2011 в диапазоне 0.1-0.8 нм (логарифмический масштаб по оси ординат, принятый в представлении данных GOES-15). Отмечено время начала СМЕ (t_1) и время первого наблюдения СМЕ (t_2).

3. Связь между началом вспышки и ассоциированным со вспышкой СМЕ. Согласно каталогу [8], всего за два последних цикла с 1997 по 2017 гг. наблюдались около 700 СМЕ типа Гало. Но из рассмотрения были исключены события, произошедшие за лимбом Солнца. Изучение связи между СМЕ (наблюдения LASCO/SOHO [8]) и вспышками в этих случаях не представляется возможным, так как вспышки (наблюдения GOES [9]) за лимбом не видны. Данные наблюдений СМЕ и их характеристики доступны в архивах и в режиме реального времени [8,10]. Все события 23-го и 24-го циклов, за исключением залимбовых, были отобраны нами для статистического изучения, всего 385 событий с СМЕ типа Гало. Мы считаем, что вспышка и СМЕ связаны между собой, если интервал времени между началом вспышки и началом СМЕ не превышает 40 мин. Очевидно, что даже при таком интервале запаздывания, события перекрываются между собой по времени. Ниже из рис.4 можно оценить величину интервала запаздывания. Результаты представлены в сводной табл.1.

Из табл.1 следует, что в 93-95% случаев для разных циклов существует связь между СМЕ типа Гало и вспышками с различной мощностью.

В таблице в первых двух колонках приведены данные о долях СМЕ

Таблица 1

**ЧАСТОТА СОЛНЕЧНЫХ СОБЫТИЙ ВЗРЫВНОГО ХАРАКТЕРА,
СОПРОВОЖДАЮЩИХСЯ ВЫСВОБОЖДЕНИЕМ БОЛЬШОГО
КОЛИЧЕСТВА ЭНЕРГИИ ВО ВСПЫШКАХ И СМЕ**

СМЕ связанные со вспышками C5-X17.5	СМЕ не связанные со вспышками C5-X17.5	Число СМЕ/Гало	Число СПС $I_{pg} \geq 2 \text{ pfu}$ ($\geq 10 \text{ МэВ}$)	Число вспышек $\geq M1$
23-й цикл				
218 (95.6%)	10 (4.4%)	228	96	1390
24-й цикл				
157 (92.4%)	13 (7.6%)	170	52	750

связанных и не связанных со вспышками (в процентах от общего числа СМЕ), для 23-х и 24-х циклов. В последней колонке для характеристики активности циклов приведены данные о количестве вспышек $\geq M1$.

Примерно в 5-7% случаев связь между СМЕ типа Гало и вспышками не установлена. Это означает, что интервал времени между началом вспышки и началом СМЕ составляет более 40 мин. Чаще всего это случается для очень слабых вспышек класса C5-C9, сопровождающих СМЕ, у которых амплитуда в максимуме в диапазоне 0.1-0.8 нм составляет менее 10^{-5} Ватт/м². Неопределенность связи усугубляет тот факт, что если есть заметный выброс СМЕ типа Гало и его сопровождает маломощная вспышка, то чаще всего сама вспышка растянута по времени, потоки от вспышки близки к фоновым значениям, что затрудняет определение времени начала вспышки.

Для определения интервалов времени между началом вспышки и началом СМЕ нами проанализированы все 385 случаев с СМЕ типа Гало в 23-24-х циклах. По данным наблюдений SOHO/LASCO C2, для всех случаев определяются времена начала СМЕ t_1 как, например, в событии 03.11.2011 на рис.2. Наблюдения SOHO/LASCO C2 события 03.11.2011 представлены в виде 11 измерений СМЕ на различном удалении от солнечного диска. Наклон прямой на рис.2 соответствует линейной скорости СМЕ (остающейся примерно постоянной) и равной 991.1 км/с. Из этого же графического представления на рис.2 определяется время начала СМЕ - t_1 , равное 21:30:42. Первое наблюдение SOHO/LASCO C2 на рис.2 (полые кружки) соответствует измерениям скорости СМЕ на расстоянии 10 радиусов Солнца $R_{\odot}$.

На рис.3 приводятся моменты первого наблюдения СМЕ типа Гало, сопутствующего вспышке 03.11.2011, соответствующие началу вспышки по данным GOES-15 (а) и моменту максимума (б). Отметим, что в момент

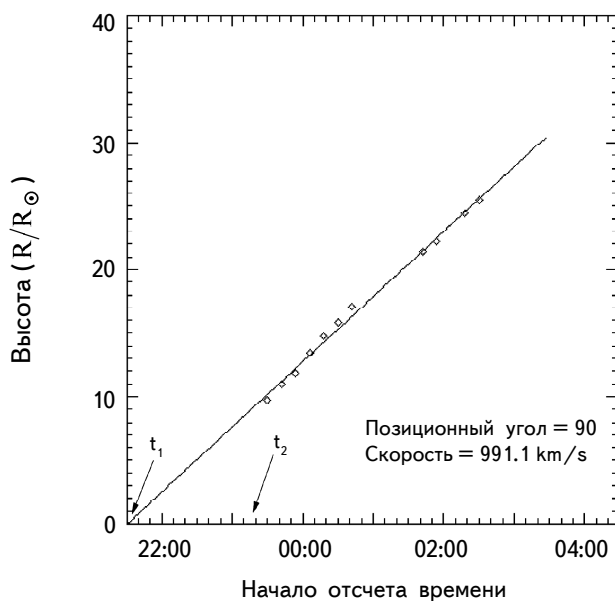


Рис.2. Наблюдения СМЕ типа Гало, ассоциированного со вспышкой 03.11.2011 по данным наблюдений SOHO/LASCO (C2) [8]. По оси абсцисс время наблюдения (UT). Время t_1 соответствует началу СМЕ, время t_2 соответствует времени первого наблюдения СМЕ. По оси ординат — приведенная высота наблюдения СМЕ в ($R/R_{\odot}$).

начала СМЕ на рис.3а виден поток плазмы в узком конусе над активной областью, расположенной над вспышкой. В момент первого наблюдения СМЕ на рис.3b виден корональный выброс, охватывающий угол в 360° , т.е.

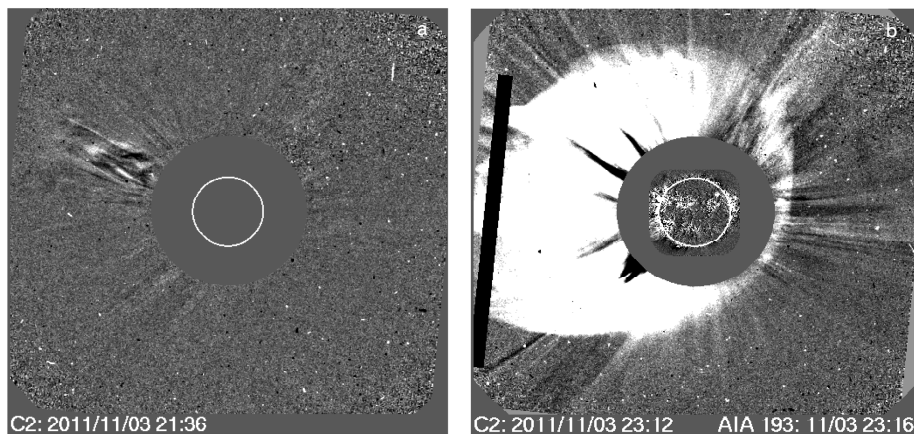


Рис.3. Наблюдения СМЕ типа Гало, ассоциированного со вспышкой X1.9 от 03.11.2011 по данным наблюдений SOHO/LASCO (C2) и SDO/AIA 19.3 нм. (a) — в момент начала СМЕ (обозначенного t_1) и (b) — в момент первого наблюдения СМЕ (обозначенного t_2), произошедшего примерно через 2 часа от начала.

данный СМЕ относится к типу Гало. Очевидно, что ориентация СМЕ типа Гало позволяет считать эти СМЕ наиболее геоэффективными среди всех СМЕ.

Для всех 385 событий СМЕ типа Гало определены моменты t_1 , соответствующие началу коронального выброса (см. рис.2 и рис.3а для события 03.11.2011) и время t_2 - время первого наблюдения коронального выброса (соответствуют рис.2 и рис.3б для события 03.11.2011). Из каталогов вспышек 23-го и 24-го циклов [11,12] для этих 385 событий определены времена начала вспышек $t_{\text{flare start}}$, а также интервал времени между началом СМЕ $t_{\text{CME start}}$ и началом соответствующей вспышки $dt = t_{\text{flare start}} - t_{\text{CME start}}$. Распределение N числа событий от величины dt представлено на рис.4. Распределение имеет некоторую асимметрию с ярко выраженным максимумом в центре. Это соответствует факту, что практически 14% событий характеризуются $dt=0$. Если предположить, что распределение на рис.4 подобно нормальному, то

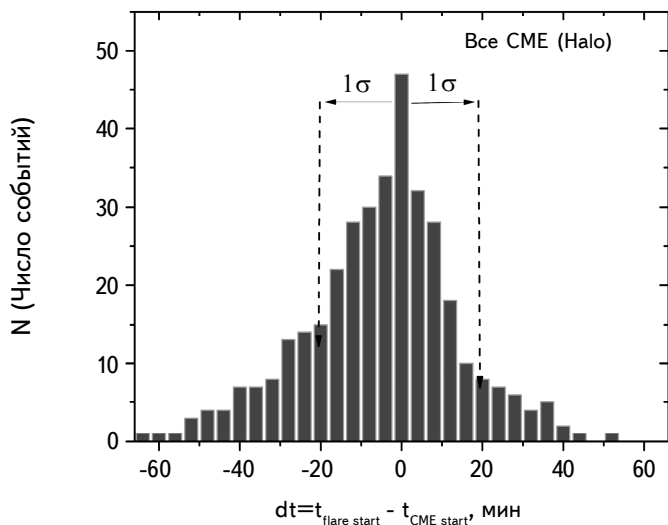


Рис.4. Связь между началом вспышки и ассоциированным со вспышкой СМЕ для 385 СМЕ типа Гало в 23-м и 23-м циклах.

можно оценить величину стандартного отклонения 1σ . Для исследуемой выборки в 385 событий $1\sigma = 20$ мин. Таким образом, в интервале $\pm 1\sigma$ заключены 66.7% событий.

4. *Связь между началом вспышки и началом СМЕ для крупных событий (класс $\geq X1$).* Для крупных событий, представляющих особый интерес в связи с последующими за ними возмущениями геомагнитных индексов, мы провели анализ между началом крупных вспышек классов $\geq X1$ и ассоциированными с ними СМЕ (см. рис.5). Таких событий в 2-х циклах

было 95.

Из рис.5 видно, что временной разброс между началом вспышки и началом СМЕ меньше, чем для всех событий подряд. Для исследуемой выборки из 95 событий $1\sigma = 10$ мин. Отметим, что для вспышек классов $\geq X1$ вспышки и СМЕ взаимосвязаны практически в 100% случаев.

Проведенный анализ подтверждает, что связь (в частности, определяемая по величине временного интервала между началом вспышки и временем первого наблюдения СМЕ) между вспышками и СМЕ уменьшается с уменьшением класса вспышек, что согласуется с [13,14].

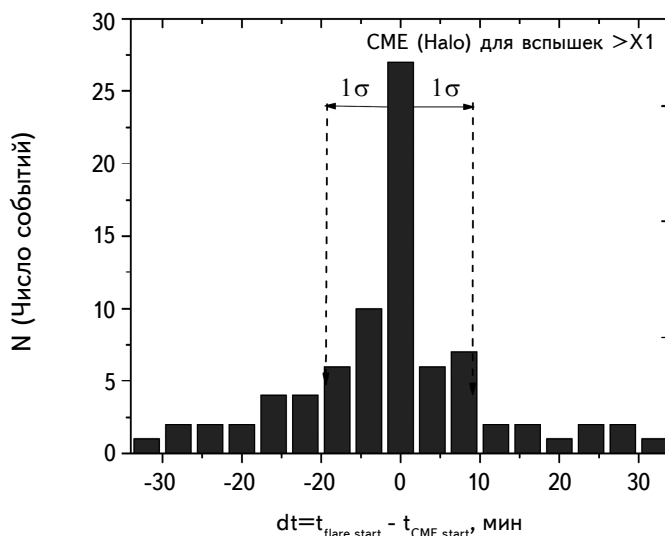


Рис.5. Связь между началом вспышки и связанным со вспышкой СМЕ для 95 СМЕ типа Гало, ассоциированных с крупными вспышками классов $\geq X1$, в 23-м и 24-м циклах.

5. Связь между характеристиками геоэффективных событий на Солнце (вспышками и СМЕ) и геомагнитными индексами. Влияние событий на Солнце на процессы на Земле определяется при анализе вариаций индексов геомагнитной активности, характеризующих мощность магнитных бурь. Наиболее часто используются Кр и Dst-индексы.

Кр-индекс (введен Дж. Бартельсом в 1938г.) - глобальный планетарный индекс геомагнитной активности, представляющий собой трехчасовой квазилонгитудинальный индекс геомагнитной активности по отношению к кривой спокойного дня (см., например, архив наблюдений GOES [15]). Планетарный индекс Кр вычисляется как среднее значение К-индексов, определенных на 13 геомагнитных обсерваториях, расположенных между 44 и 60 градусами северной и южной геомагнитных широт. Его диапазон изменяется от 0 до 9, но Кр

индекс определяется с точностью до $1/3$: 7^- означает 6 и $2/3$, 7^0 - 7 ровно, 7^+ означает 7 и $1/3$.

Для безопасности авиаперелетов, космических аппаратов и обеспечения устойчивой радиосвязи, важно прогнозировать магнитные бури с $K_p \geq 7-8$, соответствующие самым опасным событиям на Земле. Очевидно, что подавляющее количество мощных магнитных бурь связано со вспышками и сопутствующими им СМЕ. Для оценки связи между СМЕ и последующими событиями в магнитосфере также рассмотрим важную характеристику - линейную скорость $V_{\text{СМЕ}}$. Величина $V_{\text{СМЕ}}$ характеризует масштаб явления, определяет кинетическую энергию выброса.

На рис.6 приводится точечная диаграмма, характеризующая связь между линейной скоростью СМЕ - $V_{\text{СМЕ}}$ и вызванными СМЕ мощными магнитными бурями ($K_p \geq 8^-$) для событий 23-го и 24-го циклов. На рис.6 представлены все самые крупные события 2-х циклов с $K_p \geq 8^-$. В принципе, подобная связь может быть различна для событий 23-го и 24-го циклов, но поскольку подобных геоэффективных событий в 24-м цикле было всего 8, мы объединили их с событиями в 23-м цикле на одной диаграмме.

Данные по самым мощным геоэффективным событиям взяты из каталога [16], где собраны события 23-го цикла и из [17] для 24-го цикла. Можно сделать следующее заключение: в 23-м цикле было всего 12 событий с $K_p \geq 9^-$ и 40 событий с $K_p \geq 8^-$; в 24-м цикле события с $K_p \geq 9^-$ не было, а событий с $K_p \geq 8^-$ было всего 8.

Из рис.6 следует, что СМЕ, вызывающие магнитные бури с $K_p \geq 9^-$ в большинстве случаев (75%) характеризовались скоростями $V_{\text{СМЕ}} \geq 1500$ км/с,

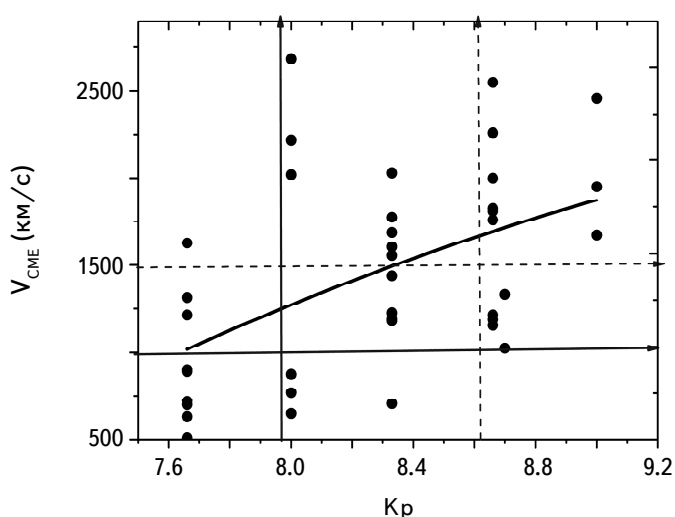


Рис.6. Взаимосвязь между K_p и $V_{\text{СМЕ}}$ за 23-й и 24-й циклы.

а события с $K_p \geq 8^-$, в большинстве случаев (80%) характеризовались скоростями $V_{CME} \geq 1000$ км/с.

Dst-индекс геомагнитной активности в низких широтах был введен Сугиурой в 1964г. как мера изменения поля из-за кольцевых токов, возникающих в магнитосфере во время магнитных бурь. Dst индекс вычисляется и публикуется Мировым центром данных по геомагнетизму в Киото [18]. Критическим значением для безопасности, например, авиаперелетов и устойчивой радиосвязи является $Dst \leq -100$.

На рис.7 представлена статистическая зависимость, характеризующая связь между V_{CME} для СМЕ типа Гало и связанными с характеристиками магнитной бури геомагнитными индексами Dst и K_p для событий 23-го и 24-го циклов.

Из рис.7, представляющего собой точечную диаграмму и состоящую из точек двух цветов (черные точки характеризуют события с $K_p < 7$, серые точки - мощные магнитные бури с $K_p \geq 7$), видно, что существует тесная связь между скоростью СМЕ и геомагнитными индексами Dst и K_p . Из рисунка следует, что критической величиной V_{CME} для прогноза крупных магнитных бурь, является величина $V_{CME} = 1000$ км/с. На рисунке отмечена область с $V_{CME} \geq 1000$ км/с и $|Dst| \geq 100$ нТ. Если V_{CME} и одновременно Dst-индекс геомагнитной активности попадают в эту область, то вероятность события на Земле с $K_p \geq 7$ равняется 0.83, а вероятность ложного события равняется 0.17.

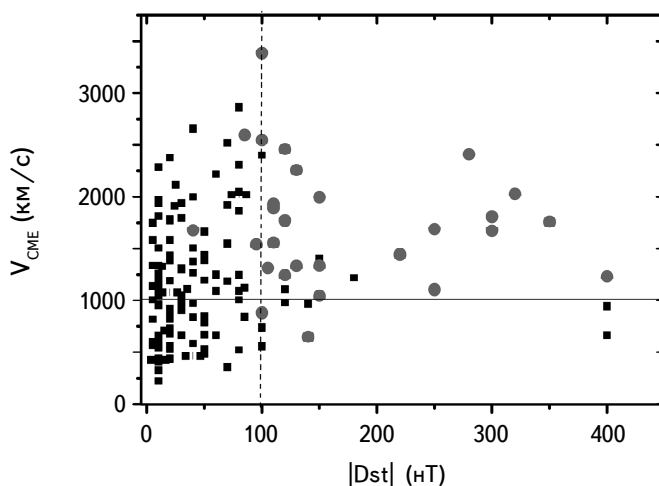


Рис.7. Взаимосвязь между $|Dst|$ и V_{CME} за 23-й и 24-й циклы с учетом зависимости от величины K_p -индекса. Серые заполненные кружки соответствуют событиям с $K_p \geq 7$.

6. Выводы. 1. Мощные вспышки классов $\geq X1$ связаны с СМЕ типа Гало, исходящими из той же активной области, практически в 100% случаев.

Для вспышек классов $< X1$ связь подтверждена в 92-95% случаев. Временной интервал между началом вспышки и началом СМЕ в среднем в 2 раза меньше для вспышек классов $\geq X1$, чем для менее мощных вспышек.

2. По величине линейной скорости СМЕ типа Гало можно оценить наступление магнитных бурь с $Kp \geq 7$, опасных для авиaperелетов, космических аппаратов и качественной радиосвязи. Таким образом, если одновременно выполняются два условия: $V_{\text{CME}} \geq 1000$ км/с и $|Dst| \geq 100$ нТ, то вероятность опасной магнитной бури на Земле с $Kp \geq 7$ составляет более 80%.

¹ Московский Государственный университет им. М.В.Ломоносова, Государственный Астрономический институт и П.К.Штернберга, Москва, Россия, e-mail: red-field@yandex.ru

² Институт Прикладной Геофизики им. Е.К.Федорова, Москва, Россия, e-mail: globur2000@yahoo.com a.s.arakelov@gmail.com yur_och@mail.ru

INTERCONNECTION BETWEEN CORONAL MASS EJECTIONS AND SOLAR FLARES ACCORDING TO OBSERVATIONS IN 23rd AND 24th CYCLES

E.A.BRUEVICH^{1,2}, V.A.BUROV², A.S.ARAKELOV², Yu.P.OCHELKOV²

Activity of the Sun of explosive type in 23 and 24 cycles has been studied. The data from satellite observations of GOES-15 X-ray in flare's fluxes and observations of coronal mass ejections (CME) on the SOHO/LASCO coronagraph were used. The delay intervals between the onset of the flare and the Halo type CME from the same active region were analyzed. Separately, all the events which were accompanied by powerful flashes of classes $\geq X1$ have been considered. It was shown that the delay interval between the onset of the flare and the onset of the Halo type CME for flares X1 classes is half the average than for the less powerful flares. The relationship between the Halo-type the onset of CME and the geomagnetic activity indices Kp and Dst , used for space weather forecasting, was estimated. It was shown that the probability of the dangerous geomagnetic storms with $Kp \geq 7$ is equal 80% if at the same time $V_{\text{CME}} \geq 1000$ км/с and $|Dst| \geq 100$ нТ.

Keywords: *Sun: 23rd and 24th activity cycles: flares: flares in the soft x-ray range: CME of Halo type: Indices of geomagnetic activity*

ЛИТЕРАТУРА

1. *S.Yashiro, N.Gopalswamy, S.Akiyama et al.*, J. Geophysical Research, **110**, A12S05, 2005.
2. *Yu.I.Yermolaev, M.Yu.Yermolaev, G.N.Zastenker et al.*, Planetary and Space Science, **53/1-3**, 189, 2005.
3. *N.Gopalswamy, M.Shimojo, W.Lu et al.*, Astrophys. J., **586**, 562, 2003.
4. *З.М.Вашаломидзе, Т.В.Закарашвили, В.Д.Кухианидзе и др.*, Астрофизика, **62**, 591, 2019, (Astrophysics, **62**, 529, 2019).
5. *V.Bothmer, R.Schwenn*, Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, **47**, 1127, 1995.
6. *N.Gopalswamy*, Geoscience Lett., **3**, 8, 2016.
7. *J.Gosling*, J. Geophysical Research, **98**, 18937, 1993.
8. SOHO/LASCO HALO CME CATALOG, (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/halo/halo.html/), 2019.
9. GOES 13-15, http://www.n3kl.org/sun/noaa_archive/, 2020.
10. CACTUS, <http://sidc.oma.be/CACTus/>, 2020.
11. Catalog of Solar Flare Events with X-ray Class M1 - X>17.5. XXIII cycle of Solar Activity (1996-2008), <http://esdb.wdcb.ru/doi/2018/esdb-sad-fe-01.html>
12. Current Catalog of Solar Flare Events with X-ray Classes M1 - X>17.5 XXIV Cycle of Solar Activity (I.2009-I0.2018), http://www.wdcb.ru/stp/data/Solar_Flare_Events/FI_XXIV.pdf, 2018.
13. *S.W.Kahler et al.*, Proceedings from the 18th International Cosmic Ray Conference, **4**, 6, 1983.
14. *S.W.Kahler, N.R.Jr.Sheeley, M.Liggett*, Astrophys. J., **344**, 1026, 1989.
15. GOES-15, <http://space-weather.ru/index.php?page=Proton-flux-24-hours-ru>, 2020.
16. Геомагнитные индексы самых мощных событий 23-го цикла, <https://www.spaceweatherlive.com/ru/avroralnaya-aktivnost/tor-50-reyting-geomagnitnyh-shtormov/solnechnyy-cikl/23>, 2009.
17. Геомагнитные индексы самых мощных событий 24-го цикла, <https://www.spaceweatherlive.com/ru/avroralnaya-aktivnost/tor-50-reyting-geomagnitnyh-shtormov/solnechnyy-cikl/24>, 2019.
18. WDC for Geomagnetism, Kyoto, <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/>, 2020.