ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2021, том 85, № 3, с. 326–330

УДК 550.385.4

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ С СОЛНЕЧНЫМИ ВСПЫШКАМИ

© 2021 г. Н. А. Бархатов[1, *], В. Г. Воробьев[2], С. Е. Ревунов[1], Е. А. Ревунова[3]

[1]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Нижегородский государственный педагогический университет имени К. Минина, Нижний Новгород, Россия*

[2]*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия*

[3]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Россия*

**E-mail: nbarkhatov@inbox.ru*

Поступила в редакцию 25.09.2020 г.
После доработки 20.10.2020 г.
Принята к публикации 27.11.2020 г.

В исследовании на основе анализа статистической связи корональных выбросов массы с солнечными вспышками устанавливается последовательность этих событий. Определены временные задержки в появлении корональных выбросов массы относительно ассоциированного с ним вспышечного проявления солнечной активности. Обнаружено, что приоритетными являются ситуации, когда вспышки опережают корональные выбросы на несколько часов.

DOI: 10.31857/S0367676521030054

ВВЕДЕНИЕ

Солнечные вспышки и корональные выбросы массы (КВМ) являются самыми высокоэнергетическими проявлениями солнечной активности. Источники КВМ, несмотря на высокое энерговыделение, а также на сопровождение вспышками и микроволновым излучением, часто не обнаруживаются на фоне фотосферы или короны и тогда могут определяться по своим остаточным явлениям. Особого внимания заслуживает такой вид КВМ, как магнитное облако (МО). В отличие от непосредственно выброса корональной массы, МО, даже не имея механического импульса, может заключать в себе гигантскую энергию магнитного поля. Из-за крайне низкого содержания частиц МО слабо меняется гравитацией Солнца, но увеличивает удельную энергию магнитного поля в результате сжатия при взаимодействии с другими плотными структурами солнечного ветра [1–6]. Уединенное МО является достаточно редким явлением и ввиду сложности обнаружения его источника долгосрочный прогноз его геоэффективности сильно затруднен. Конкретные сценарии последовательности событий КВМ и вспышек до конца не выяснены. Согласно [7] до 40% изученных КВМ сопровождались вспышками и до 90% вспышек, тем или иным образом, были связаны с КВМ. Это означает, что имеют место события КВМ, которые вообще не связаны со вспышками. Кроме того, существует мнение, что КВМ могут и опережать вспышки [8]. В связи с такой неопределенностью представляет интерес дополнительно исследовать причинно-следственную связь рассматриваемых событий.

Целью настоящего исследования является определить статистическую связь КВМ с солнечными вспышками, установить последовательность этих событий и определить время задержки между солнечными вспышками и КВМ в процессе развития солнечной активности.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Поиск статистической связи событий КВМ с проявлениями солнечной вспышечной активности выполнен по данным общедоступного обновляемого каталога http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm. Под событием КВМ в каталоге понимается непосредственно сам выброс, т.е. событие вблизи Солнца, зарегистрированное коронографом LASCO (https://www.swpc.noaa.gov/products/lasco-coronagraph). Сведения о солнечных вспышках слабой (B, C), умеренной (M) и экстремальной (X) интенсивности, были взяты из каталогов http://umtof.umd.edu/sem/sem_figs.html и

http://vso.nso.edu/cgi/catalogui. В этом случае возможный временной интервал между событием КВМ и ассоциированной вспышкой измеряется часами. В используемом каталоге приведены события магнитных облаков (МО), зарегистрированные на космическом аппарате (КА) ACE (http://www.srl.caltech.edu/ACE/) вблизи Земли. В этом случае временная задержка между таким событием МО и ассоциированной вспышкой измеряется сутками, поскольку существенно время переноса КВМ на 1AU.

Для исследования были отобраны все случаи регистрации КВМ, трансформировавшиеся в магнитные облака за период с 1996 по 2012 гг. Из этих случаев КВМ–МО для исследования были оставлены те, которые регистрировались на интервалах ±2 сут от ассоциированных солнечных вспышек слабой (B, C), умеренной (M) и экстремальной (X) интенсивности.

Магнитные облака были маркированы на “неуверенно определенные” – тип 1 и “надежно определенные” – тип 2. Обработке подвергнуты 116 событий МО, которые были сопоставлены 79 вспышкам различной интенсивности. Среди этих 116 событий ряд МО (21 событие) подтверждено нами с помощью разработанного в [1] алгоритма поиска МО в потоке данных о параметрах солнечного ветра. Как показала практика работы с каталогами, событий КВМ всегда оказывается меньше, чем событий МО, регистрируемых на спутнике ACE, поскольку не все события КВМ были зарегистрированы коронографом LASCO на спутнике SOHO вследствие сбоев или пропусков.

Статистическая связь КВМ (52 события КВМ трансформированных в МО) и МО (79 событий в окрестности Земли) с солнечными вспышками устанавливалась путем анализа соответствующих данных. При этом для каждой выборки применялись правила отбора событий относительно типа МО: 1) связь всех типов МО со всеми типами вспышек; 2) связь всех типов МО с экстремальными X-вспышками; 3) связь МО типа 2 (надежно определенных МО) со всеми типами вспышек; 4) связь МО типа 2 с экстремальными X-вспышками.

Для выборок с данными о КВМ фиксировалось время (в часах) регистрации КВМ относительно вспышки. Результаты обработки были разделены на 4 категории: 1) КВМ наблюдался на коронографе LASCO раньше вспышки (отрицательная задержка); 2) КВМ наблюдался на коронографе спустя 0–5 ч после вспышки; 3) КВМ наблюдался на коронографе спустя 5–10 ч после вспышки; 4) КВМ наблюдался на коронографе спустя более 10 ч после вспышки.

Для выборок с данными о МО зарегистрированными в окрестности Земли фиксировалось время (в сутках) регистрации МО относительно вспышки. Результаты обработки разделялись на

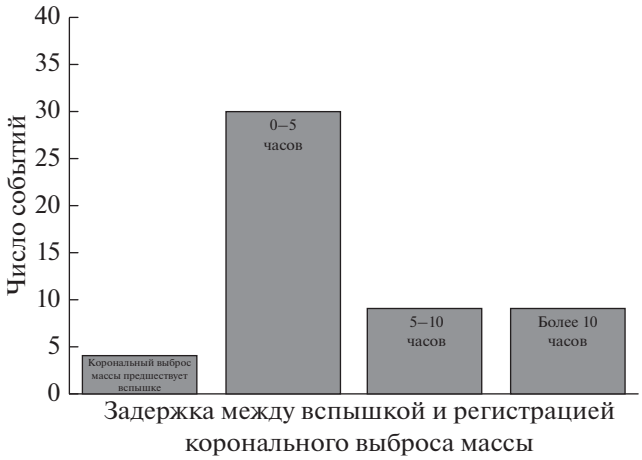

Рис. 1. Гистограмма числа замеченных событий КВМ, трансформированных во все типы МО, от времени задержки между вспышками всех типов и регистрацией КВМ.

5 категорий: 1) МО наблюдалось спустя менее суток после вспышки, что означает появление соответствующего КВМ раньше вспышки; 2) МО наблюдалось на патрульном КА ACE спустя 1–2 сут после вспышки; 3) МО наблюдалось на патрульном КА спустя 2–3 сут после вспышки; 4) МО наблюдалось на патрульном КА спустя 3–4 сут после вспышки; 5) МО наблюдалось на патрульном КА спустя более 4 сут после вспышки.

Полученные статистические результаты демонстрируются на графиках (рис. 1 и 2), которые показывают гистограмму числа произошедших событий КВМ или МО в зависимости от времени между солнечной вспышкой (задержки между вспышкой и регистрацией КВМ(часы)/МО(сутки)) и рассматриваемым событием.

АНАЛИЗ СВЯЗИ ВСПЫШЕК С КВМ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫМИ КОРОНОГРАФОМ LASCO

Первая часть статистического исследования дает результаты связи КВМ со вспышечной солнечной активностью. Полученные гистограммы отражают зависимость числа исследуемых событий от времени задержки между вспышкой и регистрацией КВМ (рис. 1).

Результатами этой части статистического исследования можно считать следующие закономерности появления КВМ относительно солнечных вспышек. КВМ могут наблюдаться как раньше, так и позднее вспышки, однако:

1) Максимальное число событий КВМ отвечает положительному временному интервалу, что соответствует ситуации, когда вспышка опережа-

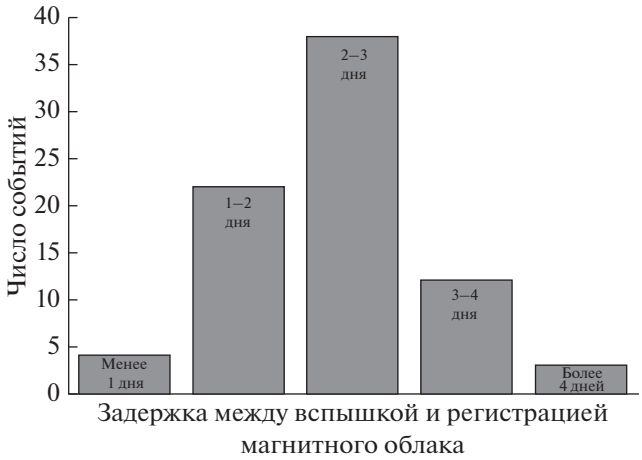

Рис. 2. Гистограмма числа замеченных событий МО всех типов, от времени задержки между вспышками всех типов и регистрацией МО.

ла КВМ на 0–5 ч. События с предшествующим вспышке КВМ крайне редки.

2) События КВМ отвечающие МО типа 1 (неуверенно определенные облака) отстают от вспышки на время порядка 1 ч.

3) События КВМ отвечающие МО типа 2 (надежно определенные облака) отстают от вспышки на время более 2 ч.

4) Самые большие задержки в появлении КВМ в 10 и более часов имеют место в случае экстремальных вспышек класса X, при этом наблюдаемые КВМ всегда трансформируются в надежные МО типа 2.

СВЯЗЬ ВСПЫШЕК С МО, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫМИ ВБЛИЗИ ЗЕМЛИ

Вторая часть статистического исследования направлена на изучение связи МО, зарегистрированных в окрестности Земли, со вспышечной солнечной активностью. Гистограммы на рис. 2 демонстрируют количество исследуемых событий в зависимости от времени задержки между вспышкой и регистрацией МО в окрестностях Земли.

Установлено, что появление КВМ относительно ассоциированных вспышек (по данным каталога) лежит во временном интервале до 15 ч. С учетом времени переноса КВМ в окрестность Земли, наблюдение МО всегда происходит позднее вспышки. Результатами этой части статистического исследования являются следующие закономерности появления МО относительно солнечных вспышек:

1) Максимальное число событий МО отвечает трехсуточной задержке по отношению к вспышке.

2) Экстремальные вспышечные события ответственны за более ранее (спустя 2–3 сут) появление в окрестностях Земли МО, опережающих спокойный солнечный ветер.

3) Задержка регистрации МО на время менее суток после вспышки отвечает КВМ, опережающим ассоциированную вспышку. Такие события редки.

РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ ПЕРЕНОСА КВМ ОТ СОЛНЦА ДО ГРАНИЦ МАГНИТОСФЕРЫ

Результаты выполненного выше статистического исследования носят в целом демонстрационный характер, что возможно является следствием качественных выводов, представленных в каталоге. Поэтому нами предпринято дополнительное исследование, направленное на уточнение связи МО с конкретным КВМ, ассоциированным со вспышкой. Для этого выполнен расчет времени переноса визуально зарегистрированного выброса типа КВМ от Солнца до патрульного космического аппарата ACE по формуле (1) согласно [9]:

$$\Delta t = \frac{-U + \sqrt{U^2 + 2ad_1}}{a} + \frac{d_2}{\sqrt{U^2 + 2ad_1}}, \qquad (1)$$

где U – начальная скорость выброса по данным коронографа LASCO (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/), a – ускорение КВМ, d_1 – дистанция, на которой изменяется скорость КВВ (0.75 а.е.), d_2 – остаток пути (0.25 а. е.). Для быстрых и медленных событий КВМ, дистанции d_1 и d_2 должны варьироваться. Как показала практика применения формулы (1), изменение d_1 для рассматриваемых событий в пределах 0.70–0.76 а.е. не приводит к заметным изменениям результата.

Выше, было показано, как статистически распределяются времена задержки между вспышкой и моментом регистрации КВМ по данным каталога http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm. В этом разделе исследования ту же задержку или опережение момента визуальной (LASCO) регистрации КВМ относительно вспышки мы получим на основе расчета времени переноса КВМ до патрульного спутника ACE. Для этого вычисляется разница между расчетным временем переноса по формуле (1) и временем регистрации КВМ, приведенным в каталоге. Результат этой операции представлен на рис. 3, на котором последовательность номеров анализируемых событий вдоль оси абсцисс выстроена таким образом, чтобы имел место рост временного интервала в часах между вспышкой и появлением КВМ.

Оценивая график на рис. 3 можно утверждать, что формула (1) расчета времени переноса [9] ви-

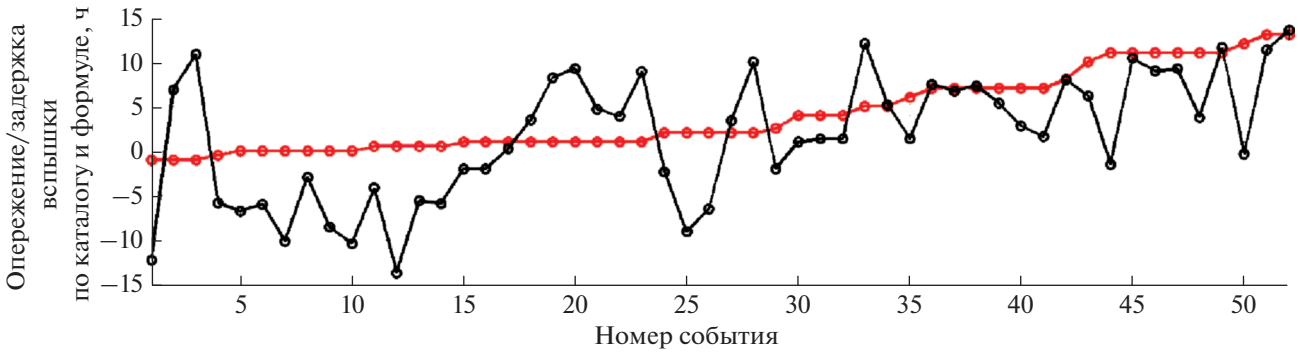

Рис. 3. Демонстрация задержки или опережения момента регистрации КВМ относительно вспышки как разницы между расчетным временем переноса и временем регистрации КВМ по каталогу. Ломаная линия отвечает времени задержки/опережения вспышки по каталогу, пологая линия является медианой вычисленной задержки.

зуально зарегистрированного выброса типа КВМ от Солнца до патрульного КА ACE допускает заметную вариативность в определении моментов регистрации вспышек. Тем не менее, вычисляемая здесь медиана задержки (пологая линия) демонстрирует общий тренд с вариациями времени задержки/опережения вспышки по каталогу и коэффициент корреляции для этих кривых (ломаная и пологая) достигает 0.56. Согласно полученным результатам, расчетная формула допускает появление КВМ раньше ассоциированной вспышки для 19 случаев из 52 рассмотренных, в то время как по данным каталога таких событий было только 4. Это свидетельствует о том, что формула неточна для проанализированных случаев появлений КВМ. Заметим, что авторы статьи [9] также допускают, что в их модели расчета времени переноса КВМ от Солнца до Земли более чем в 70% случаев возможна погрешность в ±15 ч.

При анализе последовательностей, аналогичных рис. 3, для определения связи всех типов МО с экстремальными X-вспышками и связи МО надежного типа 2 с экстремальными X-вспышками установлено, что корреляция между методами имеет место только для магнитных облаков, возникающих вслед за экстремальными X-вспышками. Таким образом, выполненный здесь сравнительный анализ методов определения времен задержки/опережения вспышки после/до КВМ показал, что в некоторых случаях методы могут дополнять друг друга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрирована статистическая связь КВМ с солнечной вспышечной активностью, которая позволяет делать выводы о вероятности сопровождения вспышек КВМ. Согласно данным каталога, приоритетными являются ситуации, когда вспышка наблюдалась на несколько часов ранее КВМ. События КВМ, предшествующие вспышке редки. Наибольшие задержки в 10 и более часов наблюдаются для КВМ, следующих за экстремальными X-вспышками. Возникающие при этом КВМ всегда трансформируются в МО. В результате экстремальные вспышечные события ответственны за появление МО, перемещающихся со скоростями выше скоростей спокойного солнечного ветра и достигающих окрестность Земли спустя 2–3 сут. Выполнен сравнительный анализ методов определения времен задержки/опережения вспышки после/до КВМ построенных на данных каталогов и с помощью известной расчетной формулы переноса КВМ в межпланетном пространстве. Заметная корреляция между результатами, полученными двумя методами, имеет место только для магнитных облаков, возникающих вслед за экстремальными X-вспышками. Показано, что в некоторых случаях методы могут дополнять друг друга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бархатов Н.А., Левитин А.Е., Ревунова Е.А.* // Геомагн. и аэрон. 2014. Т. 54. № 6. С. 718; *Barkhatov N.A., Levitin A.E., Revunova E.A.* // Geomagn. Aeron. 2014. V. 54. No. 6. P. 718.
2. *Бархатов Н.А., Ревунов С.Е., Виноградов А.Б.* // Вестн. Минин. ун-та. 2014. № 3(7). С. 25.
3. *Бархатов Н.А., Ревунов С.Е., Воробьев В.Г., Ягодкина О.И.* // Геомагн. и аэроном. 2018. Т. 58. № 2. С. 155; *Barkhatov N.A., Revunov S.E., Vorobjev V.G., Yagodkina O.I.* // Geomagn. Aeron. 2018. V. 58. No. 2. P. 147.
4. *Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Романов Р.В. и др.* // Солн.-земн. физ. 2019. Т. 5. № 3. С. 70; *Barkhatov N.A., Revunova E.A., Romanov R.V. et al.* // J. Atmos. Sol. 2019. V. 5. No. 3. P. 59.
5. *Бархатов Н.А., Долгова Д.С., Ревунова Е.А.* // Геомагн. и аэроном. 2019. Т. 59. № 1. С. 19; *Barkhatov N.A.,*

Dolgova D.S., Revunova E.A. // Geomagn. Aeron. 2019. V. 59. No. 1. P. 16.

6. *Манакова Ю.В., Пехтелева К.А., Бархатов Н.А., Ревунов С.Е.* // Вестн. Минин. ун-та. 2016. № 1-1. С. 32.
7. *Nitta N.V., Hudson H.S.* // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28. P. 3801.
8. *Harrison R.A.* // Astron. Astrophys. 1995. V. 304. P. 585.
9. *Gopalswamy N., Lara A., Yashiro S. et al.* // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. Art. No. 29207.

Investigation of the statistical relationship of coronal mass ejections with solar flares

N. A. Barkhatov[a, *], V. G. Vorobjev[b], S. E. Revunov[a], E. A. Revunova[c]

[a] *Kozma Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University, Nizhny Novgorod, 603002 Russia*

[b] *Polar geophysical institute, Apatity, 184209 Russia*

[c] *Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, 603000 Russia*

**e-mail: nbarkhatov@inbox.ru*

In the study, based on the analysis of the statistical relationship of coronal mass ejections with solar flares, the sequence of these events is established. Time delays in the appearance of coronal mass ejections relative to the associated solar flare are determined. It has been found that priority is given to situations where flares are several hours ahead of coronal emissions.