

Г. С. МИНАСЯНЦ, Т. М. МИНАСЯНЦ

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ И ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ

ДТОО «Астрофизический институт им. В. Г. Фесенкова», г. Алматы

Рассмотрены свойства геоэффективных корональных выбросов 23 цикла активности. Были исследованы физические закономерности структуры выбросов и ее изменения при движении к Земле.

1. Введение. Активными процессами на Солнце, оказывающими основное влияние на состояние межпланетного и околоземного пространства, являются вспышки и корональные выбросы массы.

Для изучения интересны те КВМ, которые достигают орбиты Земли и оказывают влияние на её атмосферу. КВМ представляют собой движущиеся от Солнца со сверхзвуковой скоростью плотные облака разогретой и намагниченной плазмы. При движении коронального выброса в межпланетном пространстве образуется ударная волна, передний фронт которой обладает повышенным динамическим давлением. Приближаясь к Земле, этот фронт сжимает магнитосферу, приводя её в возбужденное состояние [1, 2]. Это является основной причиной возникновения магнитной бури (МБ) с внезапным началом. При этом значительно облегчается осуществление эффекта пересоединения силовых линий межпланетного и земного магнитных полей, а также усиливается возможность проникновения внутрь магнитосферы энергичных солнечных частиц. В результате в магнитосферу поступает дополнительная энергия, которая впоследствии проявляется при развитии геомагнитной бури [3].

2. Физические свойства структуры выбросов. Для изучения свойств корональных выбросов нами были обобщены и проанализированы данные спутниковых наблюдений параметров и структур солнечного ветра вблизи магнитосферы Земли за период 1996-2008 гг. [4]. Были рассмотрены структурные особенности и физические свойства плазмы 104 КВМ, передние фронты которых выражены наиболее четко. С приходом переднего фронта были зарегистрированы существенные одновременные скачкообразные увеличения значений следующих физических параметров плазмы КВМ: напряженности магнитного поля - B (нТ), скорости - V (км/сек), плотности частиц плазмы - N_p (см^{-3}), температуры - T_p ($^{\circ}\text{K}$), динамического давления - $P_{\text{дин}}$ (nPa). Кроме того, дополнительно были рассчитаны значения: газового давления $P_{\text{газ}} = k (N_e \cdot T_e + N_p \cdot T_p)$, магнитного давления $P_{\text{маг}} = B^2 / 8\pi$ и их сумма, соответствующая полному давлению. Значения давлений выражены в nPa.

Изучение структуры выбросов было проведено на основе распределения в них физических параметров. Самым характерным свойством выбросов является сильная неоднородность плазмы по всему их протяжению – от всплеска значений параметров на переднем фронте до фоновых значений на задней границе выброса. Часто за областью, непосредственно примыкающей к ударному фронту, внутри тела выброса, наблюдаются отдельные структуры различной плотности. Причем сгусткам более плотной плазмы соответствуют пониженные значения напряженности магнитного поля, а промежуткам между ними – увеличенные. Пример такой обратной связи между напряженностью межпланетного магнитного поля и плотностью плазмы показан на рис. 1.

В случаях, когда плотность плазмы падает до экстремально низких значений ($N_p \sim 0.5 \text{ см}^{-3}$), одновременно наблюдается рост значений скорости и температуры. То есть, нередко, в плазме выброса наблюдается самосогласованная взаимосвязь физических параметров. Таким путем поддерживается полное давление внутри выброса при изменениях газового и магнитного давлений (рис. 2). Следует заметить, что для магнитного облака характерна более однородная структура: повышенным значениям магнитного поля с низким уровнем флуктуаций соответствуют пониженная плотность и температура. Для принятых к изучению 104 КВМ, лишь в 18 из них наблюдалась структура магнитных облаков.

Величина напряженности магнитного поля является определяющим фактором для значений полного давления, так как вклад газового давления существенно уступает вкладу магнитного давления.

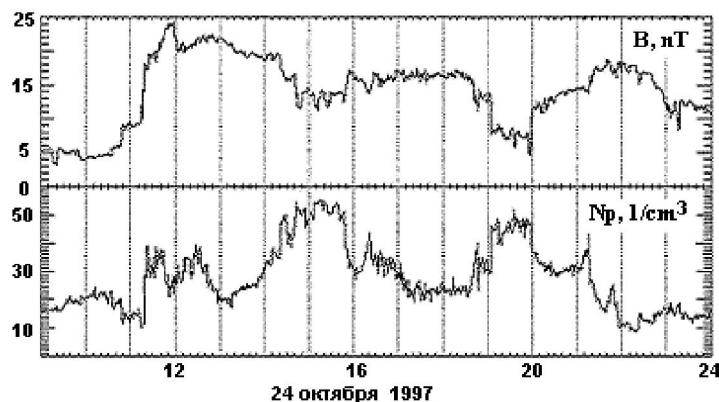


Рис. 1. Сопоставление изменений напряженности межпланетного магнитного поля B и значений плотности плазмы N_p в выбросе 24 октября 1997 г.

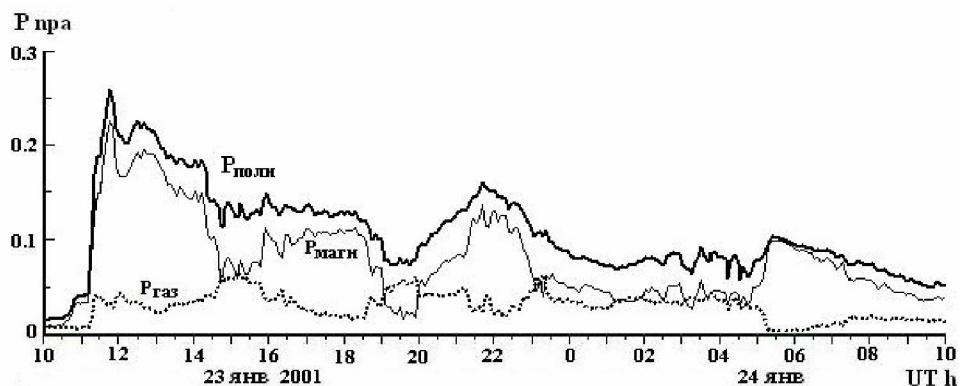


Рис. 2. Распределения рассчитанных значений $P_{\text{газ}}$, $P_{\text{маг}}$ и их суммы в плазме выброса 23-24 января 2001 г. Областям повышенного магнитного давления соответствуют области пониженного газового давления - и наоборот

Для вещества выбросов характерны высокоамплитудные изменения физических параметров. Экстремальные значения параметров обычно находятся в различных частях тела выброса. Промежуткам времени, когда B_z компонента магнитного поля имеет существенные отрицательные значения, обычно предшествует подъем динамического давления – $P_{\text{дин}}$.

Известно, что $P_{\text{дин}} = m_p \cdot N_p \cdot V^2$ существенно (на порядок, а чаще и более) превышает сумму магнитного и газового давлений; m_p – масса протона. Динамическое воздействие переднего фронта ударной волны на магнитосферу проявляется через резкое увеличение значений плотности плазмы [5]. 99% из всех рассмотренных ударных фронтов явились источниками возникновения геомагнитных бурь с внезапным началом.

Благодаря тому, что одновременно несколько космических аппаратов (КА) регистрируют параметры плазмы корональных выбросов, имеется возможность определить физические условия для одного и того же выброса в различных его участках. Для этого были построены и проанализированы изменения со временем температуры – T_p ($^{\circ}\text{K}$), скорости – V_p (км/сек), плотности частиц плазмы – N_p (cm^{-3}), напряженности межпланетного магнитного поля – B (нТ) и ее вертикальной компоненты – B_z (нТ). Использовались данные, полученные на космических аппаратах ACE, GENESIS, WIND, GEOTAIL. Были рассмотрены структуры семи КВМ, которые имели четко выраженные передние ударные фронты: 4 апреля 2001 г., 27 августа 2001 г., 29 декабря 2001 г., 23 апреля 2002 г., 17 июля 2002 г., 7 сентября 2002 г., 26 ноября 2002 г.

Для примера, на рис. 3 и 4 приведены положения космических аппаратов 27 августа 2001 г. в геоцентрической системе координат. Единица измерения координат Re – радиус Земли. Все спутники были расположены недалеко от плоскости эклиптики ($Z = 4 \div 33 Re$). Вокруг Земли показаны граница магнитопаузы и внешняя кривая – околоземная головная ударная волна. Используя значения координат КА, время прибытия к ним КВМ и величину скорости его движения, можно

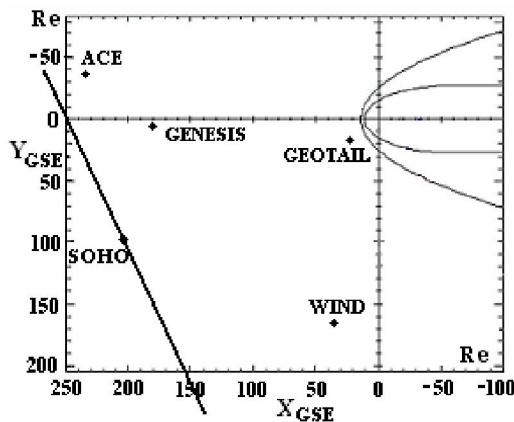


Рис. 3. Расположение космических аппаратов вблизи Земли (плоскость X - Y) при прохождении коронального выброса 27 августа 2001 г. Жирной линией показано положение переднего фронта выброса во время прохождения его через SOHO в 19h 14m

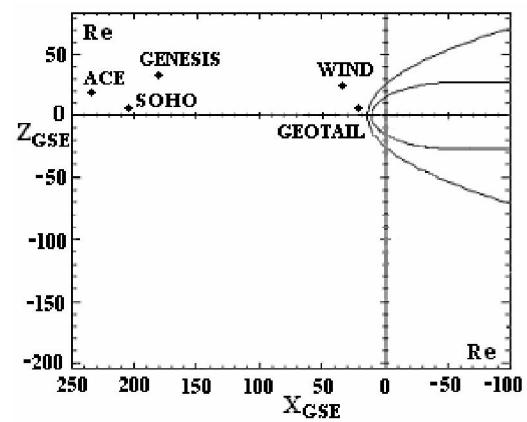


Рис. 4. Расположение космических аппаратов вблизи Земли в плоскости X - Z при прохождении коронального выброса 27 августа 2001 г.

установить положение переднего фронта выброса для момента регистрации его на КА. На рис. 3 жирной линией изображен передний фронт в момент прохождения его через КА SOHO. Наклон переднего фронта к оси Y указывает на то, что источник возникновения КВМ находился восточнее центральной зоны Солнца. Действительно, выброс, достигший Земли 27 августа 2001 г., ассоциируется со вспышкой X5.3 25 августа с координатами S17E34. Измеренный позиционный угол выброса составлял 119°.

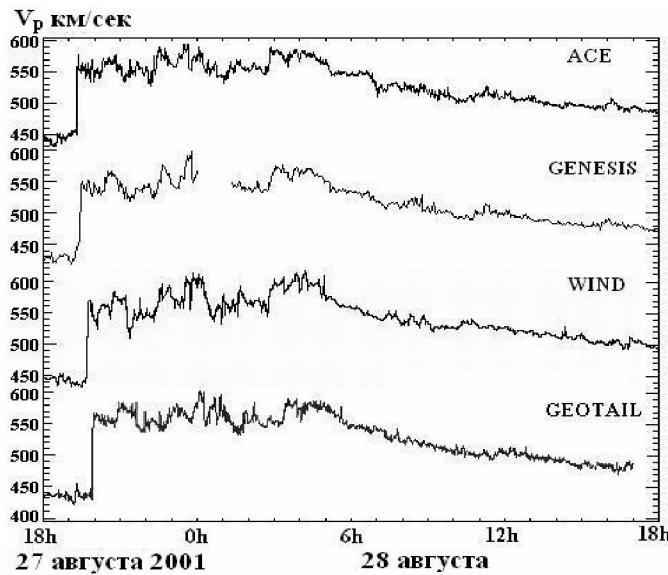


Рис. 5. Распределение значений скорости в выбросе 27-28 августа 2001 г. по данным различных космических аппаратов

Особый интерес представляют данные с тех КА, которые расположены на значительных расстояниях друг от друга и находятся вне влияния магнитосферы Земли. Таковыми на рис. 3 являются ACE и WIND. Расстояние между ними в плоскости эклиптики составляло $270 \text{ Re} = 1.7 \cdot 10^6 \text{ км}$. Для этих спутников сопоставление значений параметров плазмы в различных участках каждого из выбросов показало, что в направлении Земля-Солнце их физические структуры подобны. Этот вывод подтверждается для всех рассмотренных физических параметров. Для примера на рис. 5 показан ход изменения скорости выброса 27-28 августа 2001 г., зарегистрированного на четырех КА. Расположение КА представлено на рис. 3 и 4.

3. Геометрические размеры выбросов и некоторые характеристики переднего фронта ударной волны. Далее было проведено сопоставление некоторых параметров передних фронтов, включая и размеры выбросов.

Размер КВМ в направлении Солнце-Земля является важной характеристикой его структуры, так как он определяет продолжительность воздействия каждого выброса на магнитосферу. Принятые к рассмотрению выбросы имели размеры в направлении Солнце-Земля от 0.1 до 0.4 астрономической единицы (а.е.). Основную трудность в оценке геометрических размеров структуры выбросов представляет определение положения их задней границы, расположенной ближе к Солнцу, тогда как передняя совпадает с фронтом ударной волны. В случаях, когда положение задней границы выбросов характеризуется несколько отличающимся ходом физических параметров, их граница принималась по месту, где значения, как минимум, для трех параметров из четырех (V_p , T_p , N_p , B), становятся равными фоновым.

На рис. 6 показано сравнение значений скорости переднего фронта с геометрическими размерами выбросов. Более скоростным фронтам в среднем соответствуют более протяженные выбросы, возникновение которых относится к периоду самой значительной активности 23-го цикла: 2000–2004 гг.

Сопоставление значений скорости и плотности вещества на ударном фронте выбросов показало, что у высокоскоростных фронтов ($V_{уд.фр} > 700$ км/сек) плотность плазмы ниже, чем у более медленных ($V_{уд.фр} < 500$ км/сек).

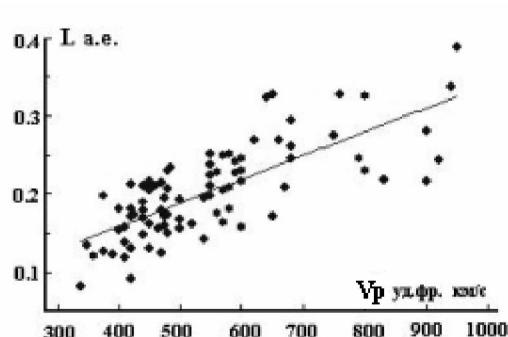


Рис. 6. Сопоставление скорости движения ударных фронтов КВМ и размеров выбросов

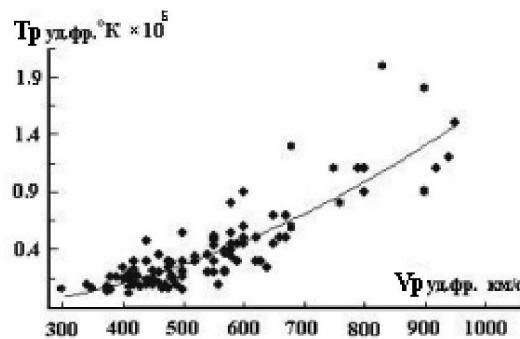


Рис. 7. Сопоставление скорости и температуры ударных фронтов КВМ

Подавляющее число ударных фронтов КВМ имеют значения температуры в интервале от $1 \cdot 10^5$ до $7 \cdot 10^5$ $^{\circ}\text{К}$, при скорости от 300 до 700 км/сек (рис. 7). Для более высоких скоростей наблюдается заметный температурный рост значений до $2 \cdot 10^6$ $^{\circ}\text{К}$.

Таким образом, для наиболее быстрых ударных фронтов ($V_{уд.фр} > 700$ км/сек) характерны более высокие значения температуры при пониженной плотности и наибольшей протяженности выбросов в направлении Солнце-Земля.

4. Свойства близко движущихся один за другим выбросов. Нередко в процессе развития мощных активных областей в них возникают одна за другой сильные солнечные вспышки с интервалом времени до нескольких часов. Соответственно, каждая из вспышек может сопровождаться корональным выбросом массы. В этих случаях выбросы, при своем движении в межпланетном пространстве, будут оказывать влияние друг на друга. Изучению структуры движущихся один за другим выбросов ранее не уделялось должного внимания.

Из всего наблюдательного материала по КВМ в течение 1997–2008 гг. были отобраны 19 случаев, когда вблизи Земли регистрировались движущиеся один за другим КВМ, с интервалами от 3-х до 30-ти часов. Установлены вероятные вспышки, которые сопровождали каждый КВМ [6]. Возникшие последовательно в одной и той же активной области, КВМ, как правило, отличаются не только стартовыми скоростями движения, но и значениями всех других физических параметров. Рассмотренные ниже, близко идущие выбросы, имели ударные фронты, которые по своим характеристикам относились к различным зонам значимости: от 2-ой до 4-ой.

При своем движении в среде солнечного ветра передовой выброс создает условия для более быстрого движения следующего за ним КВМ. В этих случаях значения всех параметров плазмы догоняющих выбросов превосходят соответствующие значения догоняемых КВМ. Самое примечательное заключается в том, что во всех последующих КВМ значения южной компоненты магнитного поля намного превышали фоновые. Это приводило к усилению геоэффективности последующих выбросов.

Было выявлено три варианта развития активности, связанной с прибытием следующих один за другим ударных фронтов:

I-ый – источником развития магнитной бури с внезапным началом становился каждый из ударных фронтов (47.4% случаев). Причем, последующие выбросы вызывали магнитные бури относительно большей мощности.

II-ой – магнитная буря начинала развиваться с приходом передового ударного фронта. Последующие выбросы только усиливали развитие магнитной бури.

III-ий вариант – магнитная буря развивалась лишь с приходом последующего ударного фронта. II-ой и III-ий варианты происходили с равной вероятностью 26.3%.

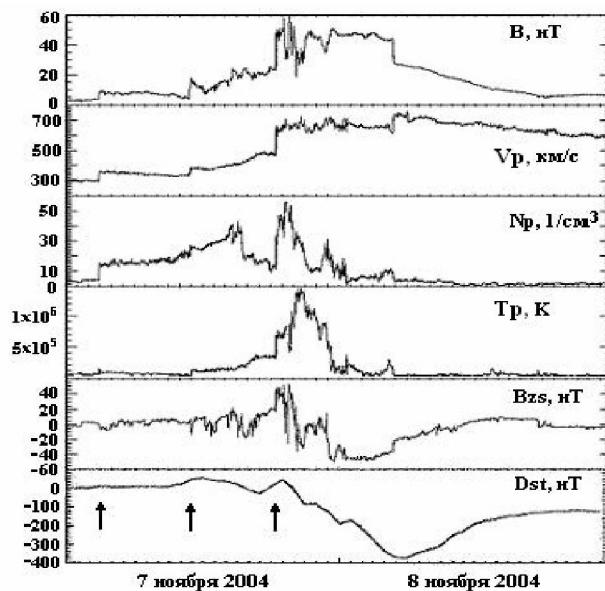


Рис. 8. Ход изменения физических параметров солнечного ветра 7–8 ноября 2004 года.

Стрелками отмечен последовательный приход трех ударных фронтов от корональных выбросов

В случаях, когда передовой выброс становился источником возникновения магнитной бури, часто ее главная фаза начиналась только с прибытием последующего выброса, где наблюдались высокоамплитудные значения южной компоненты межпланетного магнитного поля непрерывно в течение нескольких часов. На рис. 8 представлен временной ход параметров солнечной плазмы, когда в течение 7 ноября 2004 г. вблизи Земли был зарегистрирован один за другим приход трех ударных фронтов корональных выбросов масс. Все они стали источниками возникновения магнитных бурь с внезапным началом.

Солнечные вспышки, которые сопровождались этими выбросами, возникали последовательно в активной области AR 10696: 4 ноября в 22h 22m, рентгеновский балл M 2.5; 5 ноября в 11h 30m, балл M 4.0; 6 ноября в 0h 34m, балл M 9.3. В таблице представлены некоторые характеристики движения ударных фронтов от трех выбросов, с момента их возникновения вблизи Солнца (1-ый столбец) до регистрации вблизи Земли. Начальная скорость выбросов показана во 2-ом столбце.

Характеристики ударных фронтов

Дата, время	V _{нач} , км/с	T, час	V _{ср} , км/с	V _{уд.ф} , км/с
4.11.04; 23h30m	1037	52	801	390
5.11.04; 12h06m	688	47	880	445
6.11.04; 01h32m	646	41	994	675

Значения в первых двух столбцах взяты из LASCO CME CATALOG (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/index.html). Время движения выбросов до Земли (3-ий столбец) представлены в [6]. Средняя скорость движения КВМ (4-ый столбец) – легко определяется и скорость ударного фронта у Земли (5-ый столбец) – снималась с графика изменения скорости движения КВМ (временное разрешение 1 мин.).

Примечательно, что первый (ведущий) КВМ, обладая наибольшей скоростью около Солнца ($V = 1037$ км/с), вблизи Земли имел наименьшую скорость ($V_{уд.фр.} = 390$ км/с). Относительное соотношение скоростей для третьего (последнего в серии) КВМ – прямо противоположно. При скорости около Солнца $V = 646$ км/с выброс в дальнейшем существенно ускорился и показал среднюю скорость движения до Земли $V_{ср.} = 994$ км/с, сократив при этом на 11 часов отставание от первого выброса. Это произошло благодаря влиянию двух предыдущих выбросов, которые способствовали последующему – быстрее преодолеть расстояние до Земли. После прибытия третьего выброса к Земле поведение индекса Dst указывает на развитие очень сильной магнитной бури с $Dst^{\min} = -373$ нТ (нижний график на рис. 8).

ЛИТЕРАТУРА

1. Srivastava N., Venkatakrishnan P. Relationship between CME Speed and Geomagnetic Storm Intensity // *Geophys. Res. Lett.* 2002 . V. 29. Issue 9. P. 1-11.
2. Plunkett S.P., Thompson B.J. Solar source regions of coronal mass ejections and their geomagnetic effects // *J. Atmosph. and Solar-Terrestrial Physics.* 2001. V. 63. Issue 5. P. 389-402.
3. Gonzalez, W.D., Tsurutani, B.T., Gonzalez, A.L. Interplanetary origin of geomagnetic storms // *Space Science Reviews.* 1999. V. 88. Issue (3-4). P. 529-562.
4. http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html
5. Хабарова О.Б., Руденчик Е. А. О возможности прогноза магнитных бурь по результатам мониторинга осцилляторного режима солнечного ветра // Препринт ИЗМИРАН. Троицк, 2003. № 1(1154). С. 1-20.
6. An incomplete list of possible interplanetary Shocks observed by the PM. <http://umtof.umd.edu/pm/Figs.html>.

Г. С. Минасянц, Т. М. Минасянц

ТӘЖДЕГІ ЗАТТАРДЫ ШЫҒАРУДЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ЖӘНЕ ДИНАМИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

23 циклдің белсенділігі геoeffективті тәждегі заттарды шығарудың қасиеттері қарастырылған. Қалдықтар құрылымының физикалық заңдылықтары және Жердің қозгалысы кезіндегі оның өзгерісі зерттелген.

G. S. Minasyants, T. M. Minasyants

STUDY OF THE STRUCTURAL AND DYNAMIC PROPERTIES OF CORONAL EJECTIONS

Properties of the geoeffective coronal ejections of the 23-th activity cycle have been considered. The physical regularities of ejections structure and changes in them when moving toward the Earth have been investigated.