



УДК 523.98

К вопросу о происхождении плазмы, содержащейся в корональном выбросе вещества во время солнечного события 19 октября 2001 г.

В. И. Сидоров (yamari@yandex.ru)

Аннотация. Работа посвящена проблеме происхождения вещества, наполняющего корональные выбросы вещества (coronal mass ejections, CME). Исследована крупная солнечная вспышка 19 октября 2001 г., сопровождавшаяся высокоскоростным CME типа гало, который вызвал на Земле мощную магнитосферную бурю спустя двое суток. В работе сделаны оценки потоков вещества, прошедших в корону через области двух диммингов, расположенных с двух сторон от вспышки. Показано, что за временной интервал от начала вспышки до ее максимума в мягком рентгеновском излучении ($\sim 10^3$ с), в эруптивные структуры коронального выброса из его хромосферных оснований поднялось вещество с общей массой не менее $(3-7) \cdot 10^{14}$ г. При учете вещества волокна, выброшенного вместе со CME, и динамических особенностей распределения плотности плазмы в основаниях коронального выброса, суммарная оценка приближается к характерному значению массы крупных корональных выбросов вещества из каталога SOHO/LASCO, $\sim 10^{15}$ г.

Ключевые слова: солнечная вспышка, корональный выброс вещества, тонкая структура хромосферы, геоэффективность, биотропное воздействие.

Введение

Корональные выбросы вещества (CME), сопровождающие крупные солнечные вспышки, расположенные на диске Солнца, обычно имеют скорости выше 800 км/с, и за время около полутора суток после вспышки достигают орбиты Земли. При воздействии на земную магнитосферу межпланетной ударной волны, порожденной CME, а также вследствие прихода выброшенного от Солнца плазменного облака, происходят магнитосферные бури. Последние приводят к нарушениям радиосвязи, а особо мощные бури могут приводить к авариям на крупных электрических подстанциях, протяженных трубопроводах, а также провоцируют сбои в работе электронной аппаратуры и воздействуют на биосферу.

Система современной спутниковой связи GPS, а также ее отечественный аналог ГЛОНАСС, являются в настоящее время неотъемлемыми атрибутами воздушного, морского и наземного транспорта. Сбои в работе систем GPS/ГЛОНАСС, происходящие временами из-за мощных магнитосферных бурь [12], вызванных CME от крупных солнечных вспышек, могут приводить к значительным последствиям отрицательного характера.

Влияние магнитных бурь на здорового человека активно изучалось на обширных статистических данных в российско-украинском эксперименте «Гелиомед» (2003–2010 гг., [3]). Одним из важных научных результатов эксперимента явилось определение положительного влияния магнитных бурь, играющих роль естественного внешнего синхронизатора, на работоспособность здоровых людей. Это направление исследований, идущее в русле гелиобиологии, динамично развивается в последние десятилетия, используя передовые методы электропунктурной диагностики [7], и методов изучения электромагнитных параметров сердца здорового человека [8]. Таким образом, научно определено, что влияние на человечество магнитосферных бурь, порожденных в большинстве случаев солнечными корональными выбросами вещества, является глобальным.

Также на переднем крае науки находится проблема истории влияния Космоса, и в большей степени ближайшей звезды – Солнца, на зарождение земной жизни [5], что явилось определяющим фактором дальнейшего развития планеты Земля. Воздействие на биосферу солнечных СМЕ, жесткого излучения солнечных вспышек и космических лучей в далеком прошлом, могло приводить к резким по геологическим масштабам времени сменам разнообразия биологических видов в моменты переполюсовки глобального магнитного поля Земли. В такие моменты, происходящие, по данным геологии, в среднем один раз в 10–20 тыс. лет, магнитное поле Земли могло уменьшаться в разы или более, что приводило к непосредственному воздействию солнечного ветра и межпланетных СМЕ на верхнюю атмосферу планеты. Данное влияние ужесточало естественный отбор биологических видов и приводило к резкой их смене.

Вследствие перечисленных причин, изучение природы вещества СМЕ имеет актуальность для наук о Земле. Известно, что основная часть всей энергии быстрого СМЕ (> 800 км/с) содержится в его кинетической энергии. Отсюда важной научной задачей является выяснение происхождения вещества, наполняющего корональный выброс. Вопрос этот важен еще по той причине, что плотность плазмы в нижней короне, в которой развивается СМЕ, совершенно недостаточна для объяснения его характерной массы.

Общепринято, что вспышки, произошедшие на западной полусфере солнечного диска, являются статистически более геоэффективными.

Данные

Исследована солнечная вспышка 19 октября 2001 г., имевшая крупный оптический и рентгеновский балл 2В/X1. 6 с максимумом развития в мягком рентгеновском излучении в 16:30 UT по данным космического аппарата (КА) *GOES*. Вспышка произошла в активной области (АО) 9661 с гелиографическими координатами 15° северной широты и 29° западной долготы. Она сопровождалась быстрым СМЕ типа гало (скорость фронта 901 км/с). Ранее это солнечное событие было достаточно подробно описано в статьях [4; 6; 13]. Для анализа были использованы данные в линии H α , полученные на обсерватории Big Bear (рис. 1).

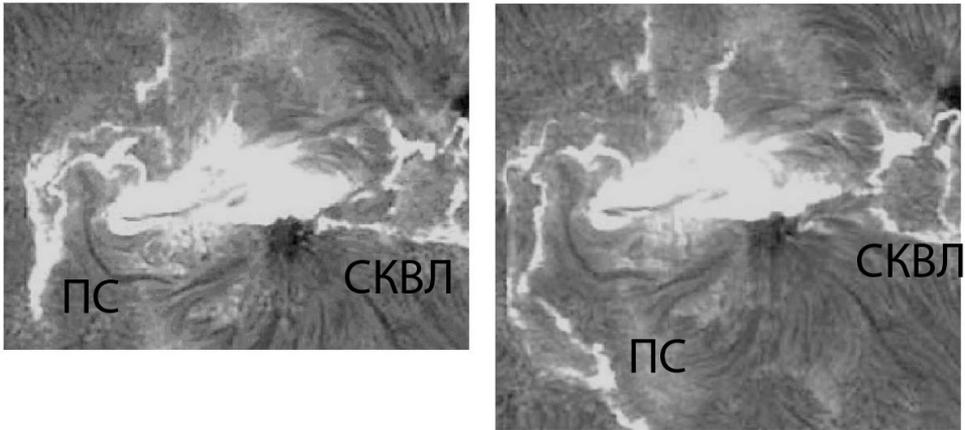


Рис. 1. Вспышка 19 октября 2001 г. в линии $H\alpha$ в максимальной стадии, 16:30 UT и 16:33 UT, соответственно. Данные обсерватории Big Bear (BBSO). Север – вверху. Хромосферные основания СМЕ, в виде структур на концах вспышечных лент (СКВЛ) и периферийных структур (ПС) показаны стрелками. Пояснения в тексте

В настоящей работе, кроме того, анализировались данные наземной обсерватории Big Bear (BBSO) о фотосферном магнитном поле (рис. 2), а также изображения в линиях ближнего ультрафиолета 171\AA , 195\AA , 284\AA , полученные КА TRACE, и данные коронографа SOHO/LASCO.

На орбите Земли в связи с исследуемым событием наблюдалось через двое суток после вспышки резкое возрастание в полтора-два и более раз параметров солнечного ветра: скорости, плотности, а также тепловой скорости протонов, которое было зарегистрировано по данным КА SOHO (рис. 3).

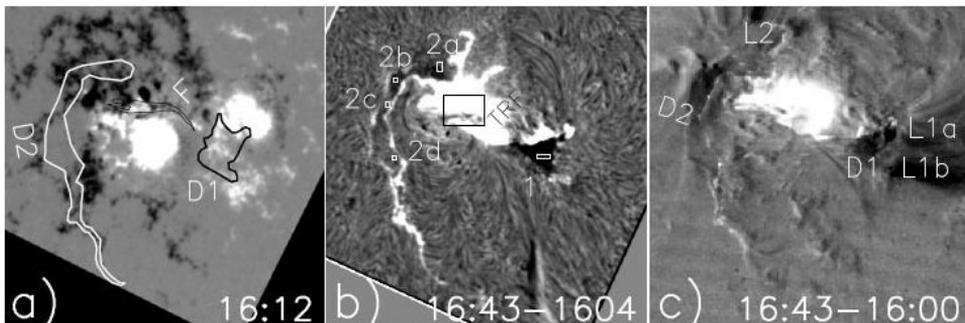


Рис. 2. На левой панели приведено вертикальное МП с нанесенным положением диммингов D1 и D2 в хромосферной линии $H\alpha$ (показаны черной и белой линией, соответственно). На центральной и правой панелях – разностные снимки (димминги) в линии $H\alpha$ (обсерватория BBSO) и в линии 171\AA , соответственно. Рисунок взят из статьи [17]. Пояснения приведены в тексте

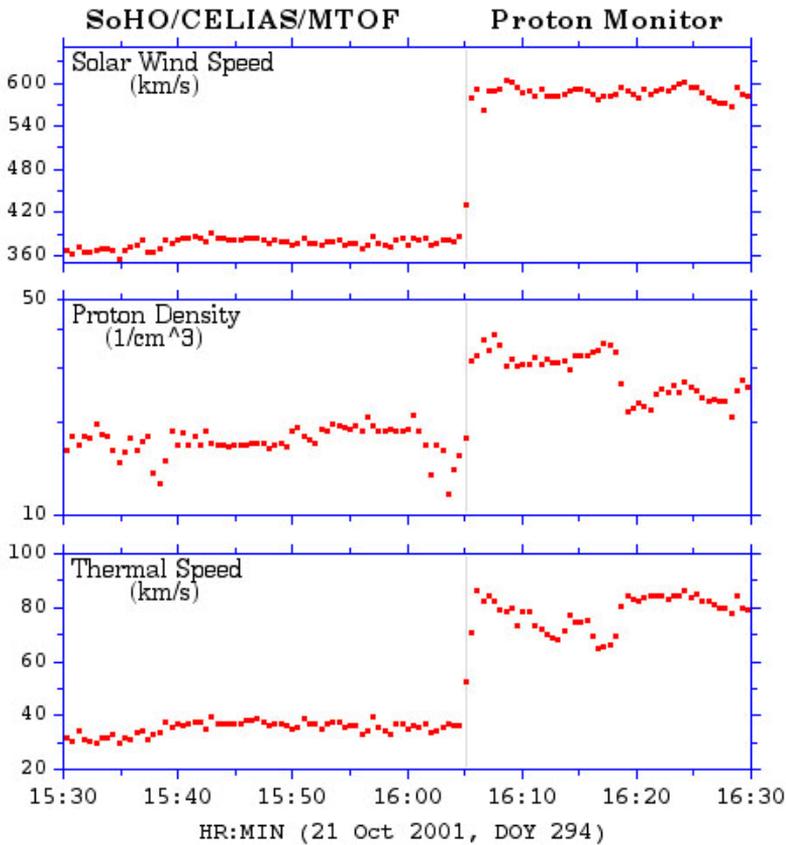


Рис. 3. Скачок параметров солнечного ветра 21 октября 2001 г. в 16:05 UT на орбите Земли по данным *SOHO/CELIAS/MTOF*

Причем, скорость ветра возросла с 400 до 600 км/с; плотность протонов с $20/\text{см}^3$ до $40/\text{см}^3$; тепловая скорость с 30 до 80 км/с. Резкое возрастание параметров (в 1,5–2,5 раз) связано с приходом межпланетного СМЕ, ассоциированного со вспышкой 19 октября 2001 г. Легко показать, что средний поток тепловых протонов солнечного ветра (произведение плотности протонов на скорость солнечного ветра) скачкообразно вырос в 3 раза. Это подтверждает приход от Солнца облака уплотненной плазмы, порожденной СМЕ, наблюдавшимся вблизи Солнца коронографом *LASCO/SOHO* 19 октября 2001 г.

Однако здесь необходимо сделать оговорку. Дело в том, что 19 октября в этой же АО 9661 произошла на 13 ч ранее (с максимумом в 01:05 UT) еще одна вспышка такого же оптического и рентгеновского балла X1. 6/2В, также имевшая СМЕ типа гало. Тем не менее, скорость СМЕ от более ранней вспышки, 558 км/с, настолько уступает скорости коронального выброса от исследуемой нами вспышки, 901 км/с, что за время распространения

этих выбросов в гелиосфере до орбиты Земли, можно считать с уверенностью, они слились в одно крупномасштабное межпланетное возмущение.

При сопоставлении геоэффективности этих двух вспышек можно также отметить более значительные энергичные протоны от второй вспышки по данным КА GOES, зарегистрированные на орбите Земли (рис. 4). Это небольшое протонное возрастание 19 октября 2001 г., с амплитудой до 11 pfu ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$), обычно приписывают первой вспышке, произошедшей в этот день. Однако, как хорошо видно из приведенных данных, два максимума потоков протонов, соответствующие двум вспышкам, уверенно отождествляются. Расположение изучаемой вспышечной АО 9661 на западной полусфере Солнца способствовало тому, чтобы энергичные протоны солнечных вспышек 19 октября 2001 г. в этой АО, выйдя в гелиосферу, достигли Земли с близкой задержкой по времени, составившей несколько часов.

Можно видеть, что максимумы протонных возрастаний от двух вспышек 19 октября 2001 г. примерно равны для высоких энергий, ≥ 100 МэВ. Однако в диапазонах меньших энергий, ≥ 50 МэВ и ≥ 10 МэВ, максимум протонного возрастания от исследуемой вспышки выше в полтора раза, чем предыдущий максимум.

Таким образом, использованы данные о солнечном событии, позволяющие анализировать как развитие CME во время крупной солнечной вспышки, так и последующие изменения космической погоды вблизи Земли.

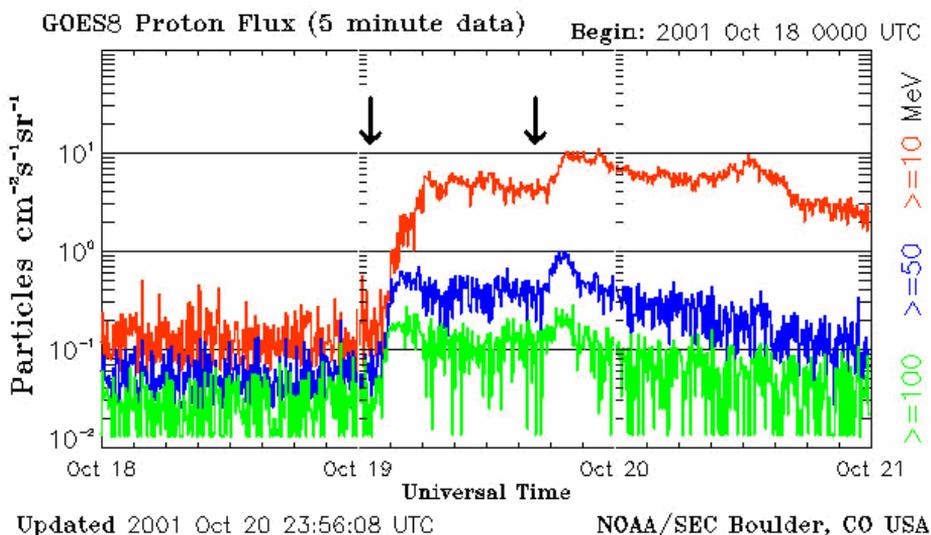


Рис. 4. Протоны с энергиями 100, 50 и 10 МэВ, зарегистрированные на орбите Земли (данные КА GOES). Стрелками обозначены две вспышки балла X1.6

Метод

Работа основана на концепции, развиваемой в предыдущих исследованиях [9], согласно которой вещество СМЕ имеет происхождение из хромосферных оснований, фиксируемых по эмиссии особого типа во время мощных вспышек. Данный тезис хорошо согласуется с утверждением более ранних исследователей [13]. Хромосферные основания СМЕ, довольно надежно определяемые в ряде вспышек [10], имеют, в зависимости от своих наблюдаемых особенностей, устоявшиеся названия: структуры на концах вспышечных лент (СКВЛ) – спиральной либо квазикольцевой формы [2]; периферийные структуры (ПС) – в форме двойной быстро бегущей эмиссионной полосы с общим ярким «фронтом» [4]; а также в виде уярченных хромосферной сетки [10], удаленных на 100–200 тыс. км от вспышечной активной области (АО).

Главным отличием хромосферных оснований СМЕ от вспышечных лент в линии $H\alpha$, располагающихся по две стороны от линии раздела полярностей (ЛРП) вертикального фотосферного магнитного поля (МП), является развитие каждого основания СМЕ в области вертикального фотосферного МП одной полярности (см. рис. 2, слева). Это обстоятельство объясняется, на наш взгляд, только путем магнитного сопряжения двух хромосферных оснований СМЕ. В случае события 19 октября 2001 года, СКВЛ и ПС являются двумя хромосферными основаниями крупномасштабного магнитного жгута, эрупция которого инициировала быстрый СМЕ, зарегистрированный коронографом LASCO/SOHO на высотах более 3 солнечных радиусов.

Вещество образовавшегося СМЕ, порядка 10^{14} – 10^{15} г, наполняет его эруптивные структуры за время прохождения им высот с нескольких десятков тысяч километров до 2–3 радиусов Солнца. И поскольку до начала активизации магнитный жгут содержал в себе количество вещества на несколько порядков меньше, чем характерный быстрый СМЕ, то естественной областью для поиска источника вещества, развивающегося в нижней короне СМЕ, являются его хромосферные основания.

В настоящей работе сделаны количественные оценки массы вещества, прошедшего через хромосферные основания (СКВЛ и ПС) в корональные структуры СМЕ, ассоциированного со вспышкой 19 октября 2001 г.

Для расчета использовано выражение:

$$m = (S_1 + S_2) \cdot \rho \cdot v \cdot t \cdot m_p \quad (1),$$

где m – масса вещества, наполнившая объем СМЕ через хромосферные основания СКВЛ и ПС; S_1 и S_2 – площади двух хромосферных оснований СМЕ, соответственно; ρ – плотность плазмы в нижней короне; v – скорость вертикальной эвакуации вещества из оснований СМЕ на высотах нижней короны; t – время наполнения СМЕ веществом; m_p – масса протона.

Данная оценка является оценкой снизу по следующим обстоятельствам. Используемые площади хромосферных оснований выброса, СКВЛ и

ПС, через которые вещество наполняет СМЕ, заведомо меньше соответствующих площадей оснований СМЕ в нижней короне, вследствие роста с высотой площади сечений оснований СМЕ. Также используемое характерное значение концентрации плазмы в короне, $\rho = 10^9/\text{см}^3$, является оценкой снизу. Данное утверждение поддерживается тем фактом, что хромосферное испарение из СКВЛ и ПС в корону, произошедшее вследствие частичного падения в эти области выброшенного волокна, согласно известному механизму Хайдера, увеличивает здесь локальное значение плотности. Это справедливо, по крайней мере, до высот ~ 50 тыс. км, которые соответствуют нижней короне, параметры которой (скорость подъема и концентрация плазмы) используются в расчетах. Испарение плазмы во вспышке подтверждается яркими основаниями некоторых послевспышечных петель, наблюдавшихся в линии $\text{H}\alpha$ [13].

Площадь диммингов в линии Н-альфа, $(S_1 + S_2)$, составила $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^2$ [3]. Выбор среднего значения скорости истекания вещества из хромосферы в корону определялся следующим образом. Скорость фронта СМЕ, наблюдаемого на расстояниях более 3 солнечных радиусов от его поверхности, 901 км/с, является заведомо превышающей значение искомого параметра. Характерные значения обычно составляют 100–200 км/с. Нами было выбрано значение скорости подъема (эвакуации) вещества, $v \sim (1-2) \cdot 10^7 \text{ см/с}$, близкое к средней скорости роста вершины магнитного жгута, наблюдавшегося в линии 171 \AA по данным TRACE, 188 км/с [13].

Время наполнения веществом структур расширяющегося СМЕ, растущего в нижней короне, принято $t \sim 10^3 \text{ с}$, соответствующее длительности фазы роста вспышки в мягком рентгене, по данным спутника GOES, с 16:16 UT до 16:31 UT, от начала вспышки до ее максимума, соответственно. Этот временной интервал также соответствует наблюдению выбрасываемого волокна [13].

Результаты и дискуссия

Поток плазмы (протонов) через хромосферные основания СМЕ составил не менее: $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^2 \cdot (1-2) \cdot 10^7 \text{ см/с} \cdot 10^9 \text{ см}^{-3} = (2-4) \cdot 10^{35} \text{ протонов/с}$. При учете массы протона, $m_p = 1,67 \cdot 10^{-24} \text{ г}$, и временного интервала, $t \sim 10^3 \text{ с}$, получим полную массу СМЕ, не менее: $m = (3-7) \cdot 10^{14} \text{ г}$. Рассчитанное значение нижнего предела массы СМЕ 19 октября 2001 г. близко к характерным значениям быстрых СМЕ, ассоциированных с крупными вспышками, $\sim 10^{15} \text{ г}$, из каталога SOHO/LASCO [14].

При дополнительном учете массы вещества выброшенного волокна, а также локального увеличения плотности корональной плазмы вследствие хромосферного испарения из СКВЛ и ПС, суммарная оценка массы СМЕ возрастет.

Рассмотрим варианты хромосферного испарения плазмы в корональные арки, принадлежащие двум разным типам вспышечных магнитных структур:

- вспышечным корональным аркадам, опирающимся на эмиссионные хромосферные ленты в линии $H\alpha$;
- и выбрасываемым корональным аркадам магнитного жгута, опирающегося на СКВЛ и ПС.

При хромосферном испарении плазмы из эмиссионных вспышечных лент происходит наполнение хромосферной плазмой корональных магнитных петель вспышечной аркады. Затем, на стадии спада вспышки, остывшее вещество в этих петлях видно в поглощении на фоне яркой хромосферы в линии $H\alpha$. Это – хорошо известные послевспышечные корональные петли, соединяющие разошедшиеся в разные стороны от ЛРП вертикального МП вспышечные ленты в линии $H\alpha$. Плотность плазмы в послевспышечных петлях должна быть не менее $10^{12}/\text{см}^3$ [1]. В противном случае они были бы прозрачны на фоне яркой хромосферы.

Однако другой тип магнитных структур, а именно входящих в СМЕ, опирающийся на хромосферные СКВЛ и ПС, наполняется веществом несколько по-другому. Тот же процесс хромосферного испарения (рис. 5), вызванный как высыпанием потоков ускоренных во вспышке частиц, так и падением части волокна, приводит к попаданию вещества из хромосферных СКВЛ и ПС в нижнюю корону. На этом сходство заканчивается. Быстрое расширение магнитного жгута в корону и непрерывное увеличение на несколько порядков величины объема развивающегося СМЕ приводят к значительно меньшим плотностям плазмы.

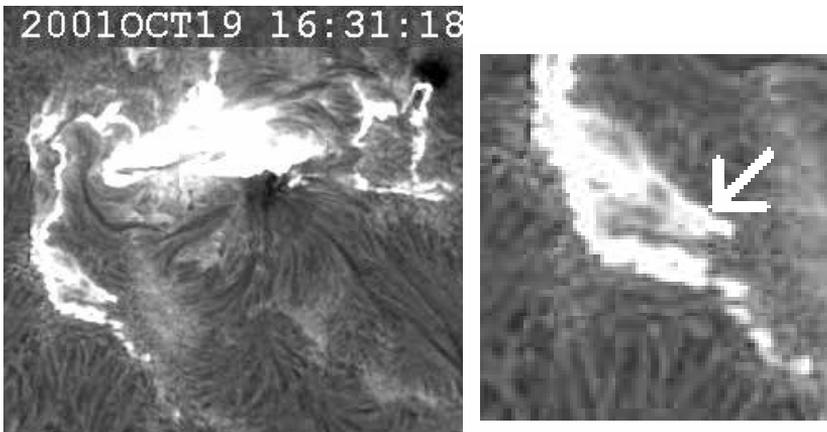


Рис. 5. Фильтрограмма вспышки 19 октября 2001 г. в линии $H\alpha$.

Стрелкой на правой панели отмечены полосы слабой эмиссии, расходящиеся влево-вверх от яркого узла периферийных структур (хромосферного основания СМЕ)

Так, эмиссионный элемент, обозначенный на рис. 5 стрелкой, скорее всего, относится к «ногам» высоких корональных арок СМЕ, поскольку ПС находятся в униполярной области фотосферного МП (см. также рис. 2, слева). По нашему предположению, указанные слабосветящиеся полосы, от-

ходящие влево-вверх от яркого узла ПС, свидетельствуют о хромосферном испарении из хромосферных ПС в корону, в образующийся СМЕ.

Согласно [13], происходила потеря вещества из диммингов, наблюдавшихся в линии Na в большом температурном диапазоне 10^4 – $2 \cdot 10^6$ К из более глубоких и плотных слоев хромосферы. Причем корональные димминги, наблюдавшиеся в линиях ближнего ультрафиолета, имели ясных оптических двойников. Потемнения в линии Na (рис. 2, средняя панель), по-видимому, являются оптическими двойниками транзитных корональных дыр во вспышке, сопровождающейся СМЕ типа гало.

Таким образом, проведенное исследование подтверждает концепцию, в которой хромосферные основания СМЕ, часто проявляющиеся в виде так называемых эмиссионных структур на концах вспышечных лент (СКВЛ) и периферийных структур (ПС), могут являться основными источниками вещества СМЕ в больших солнечных вспышках, имеющих значительную геоэффективность [11]. Плотная атмосфера Солнца, в отличие от плазмы разреженной короны, имеет повышенное содержание средних и тяжелых элементов. Данное обстоятельство должно иметь значение для биологической истории Земли в моменты переполюсовки ее магнитного поля и для учета многопланового влияния Космоса на современную биосферу и техносферу.

Автор благодарен Г. Н. Кичигину и С. А. Язеву за полезные обсуждения и всестороннюю поддержку.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 11–02–92202 Монг_а, Программы Президиума РАН № 4 и Госконтракта № 14.518.11. 7047.

Список литературы

1. Банин В. Г. Комплекс активности и большие вспышки в мае 1981 года / В. Г. Банин // Исслед. по геомагнетизму, аэрномии и физике Солнца. – 1983. – Вып. 65. – С. 129–150.
2. Банин В. Г. Сильная хромосферная вспышка 5 ноября 1970 г. / В. Г. Банин, А. С. Федорова // Исслед. по геомагнетизму, аэрномии и физике Солнца. – 1971. – Вып. 20. – С. 73–85.
3. Биотропное воздействие космической погоды (по материалам российско-украинского мониторинга «Гелиомед» 2003–2010) / под ред. М. В. Рагульской. – М., Киев, – СПб., 2010 – 312 с.
4. Комарова Е. С. Особенности развития солнечной вспышки 19 октября 2001 г. / Е. С. Комарова, В. И. Сидоров, С. А. Язев // Солнечно-земная физика. – 2004. – Вып. 6 (119). – С. 90–92.
5. Космические факторы эволюции биосферы: новые направления исследований / В. Н. Обридко [и др.] // Программа Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика-2012», Пулково, 24–28 сентября 2012 г. – <http://www.gao.spb.ru/russian/conf2012/program.html>.
6. Особенности солнечного эруптивного события 19 октября 2001 г. / А. А. Гнездилов [и др.] // Активные процессы на Солнце и звездах. 2002 : тр. науч. конф. стран СНГ и Прибалтики. Санкт-Петербург, 1–6 июля 2002 г. НИИРФ СибГУ. – С. 24–27.

7. Рагульская М. В. Вместо заключения: воздействие космофизических магнитных бурь на здоровье человека и социум – мифы или реальность? / М. В. Рагульская // Биотропное воздействие космической погоды (по материалам российско-украинского мониторинга «Гелиомед» 2003–2010) / под ред. М. В. Рагульской. – М. ; Киев ; СПб., 2010. – С. 305–311.

8. Самсонов С. Н. Параметры космической погоды и состояние сердечно-сосудистой системы человека: групповые и популяционные эффекты / С. Н. Самсонов // Биотропное воздействие космической погоды (по материалам российско-украинского мониторинга «Гелиомед» 2003–2010) / под ред. М. В. Рагульской. – М., Киев, – СПб. – 2010 – С. 69–90.

9. Сидоров В. И. Топологическая модель солнечного события, включавшего вспышку и корональный выброс массы 19 октября 2001 года / В. И. Сидоров, С. А. Язев // Косм. исслед. – 2008. – Т. 46, № 4. – С. 329–335.

10. Сидоров В. И. О топологии выбросов коронального вещества в мощных вспышечных событиях на Солнце / В. И. Сидоров, Г. Н. Кичигин, С. А. Язев // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. – 2010. – Т. 3, № 2. – С. 139–155.

11. Сидоров В. И. Происхождение плазмы коронального выброса в солнечном событии 19.10.2001 / В. И. Сидоров // Сб. резюме докл. конф. «Астрономия в эпоху информационного взрыва: результаты и проблемы» (28 мая – 1 июня 2012 г., Москва, МГУ). – М., 2012. – С. 17.

12. Afraimovich E. L. Geomagnetic disturbances, and the GPS operation / E. L. Afraimovich, O. S. Lesyuta, I. I. Ushakov // Geomagnetism and Aeronomy. – 2002. – Vol. 42, N 2. – P. 220–227.

13. H α -dimmings associated with the X1.6 flare and halo CME on October 19 2001 / Y. Jiang, H. Ji, H. Wang, H. Cheng // Astrophysical Journal Letters. – 2003. – Vol. 597 – L161-L164.

14. URL: http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/2001_10/univ2001_10.html

On the origin of plasma in the coronal mass ejection during the 19 Oct 2011 solar event

V. I. Sidorov

Annotation. This study addresses the origin of the substance filling coronal mass ejections (CMEs). We investigated the 19 Oct 2011 major solar flare accompanied by a «halo»-type high-velocity CME that caused a powerful magnetospheric storm on the Earth two days after. We made the estimates for the substance flows that permeated into the corona through the areas of two dimmings located on the flare's either side. The total $(3-7) \cdot 10^{14}$ g substance is shown to have risen to the coronal ejection eruptive structures from its chromospheric bases within the flare onset and its soft X-ray maximum ($\sim 10^3$ s). When accounting for the filament substance ejected with the CME and dynamic peculiarities of the plasma density distribution in the bases, the total estimate reaches the representative value ($\sim 10^{15}$ g) for large coronal mass ejections from the LASCO/SOHO catalogue.

Key words: solar flare, coronal mass ejection, chromosphere fine structure, geoefficiency, biotroptic influence.

Сидоров Владимир Ильич
Иркутский государственный университет
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
научный сотрудник
Институт солнечно-земной физики
СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а
ведущий инженер
тел.: (3952) 27-12-94

Sidorov Vladimir Ilyich
Ph. D. in Physics and Mathematics
Irkutsk State University
1, K. Marx str., Irkutsk, 664003
researcher
Institute of Solar-Terrestrial Physics of
Siberian Division of Russian Academy of
Science
126a, Lermontova str., Irkutsk, 664033
leading engineer
tel.: (3952)-27-12-94