

УДК 523.985

Э. И. Могилевский, Н. С. Шилова

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
Российской академии наук
142190, Россия, Московская область, Троицк

О ВОЗМОЖНОЙ СОЛИТОННОЙ МОДЕЛИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Рассматривается возможная солитонная схема солнечных вспышек, основанная на материалах наблюдений в ультрафиолете, в основном в линиях C IV $\lambda\lambda$ 155 нм, которые получены с высоким пространственным разрешением 1" на космическом аппарате TRACE. Показано, что основным носителем энергии вспышек могут быть солитоны.

ПРО МОЖЛИВУ СОЛІТОННУ МОДЕЛЬ СОНЯЧНИХ СПАЛАХІВ, Могилевський Е. І., Шилова Н. С. — Розглядається можлива солітонна модель сонячних спалахів, основана на матеріалах спостережень в ультрафіолеті, в основному в лініях C IV $\lambda\lambda$ 155 нм, з високим просторовим розділенням 1" на космічному апараті TRACE. Показано, що основним носієм енергії спалахів можуть бути солітони.

ON A POSSIBLE SOLITON MODEL OF SOLAR FLARES, by Mogilevsky E. I., Shilova N. S. — We investigate the soliton scheme of solar flares based on the TRACE UV-spectra (mainly the C IV $\lambda\lambda$ 155 nm filtergrams) obtained with high special resolution 1". It is shown that solitons can be main flare energy carriers.

ВВЕДЕНИЕ

Поиск альтернативной концепции солнечных вспышек связан с трудностями в общепринятой теории вспышек. В ней основным источником энергии принимается магнитное пересоединение поля в активной области (АО). Энергия вспышек на Солнце может либо накапливаться, а затем реализоваться, либо процесс энерговыделения может происходить незамедлительно. Принятая концепция вспышек с магнитным пересоединением относится к первому классу. Считается, что в результате динамических процессов в АО на фотосферном уровне движения или изменения магнитной структуры происходит процесс энерговыделения с накоплением его в плазме атмосферы. Накопленная энергия транспортируется к месту ее реализации во вспышке. Эта концепция из-за несоответствия с наблюдениями неоднократно подвергалась критике (см., например, [17]). Основные теоретические положения этой модели разрабатывались многими теоретиками в 1950—1970 гг.

Перечислим некоторые трудности теории магнитного пересоединения.

1. Крупномасштабная динамика магнитного поля в АО перед вспышкой далеко не однозначно связана с появлением вспышки. Рост или распад пятен, образование или распад магнитного шира только статистически коррелируют со вспышками. Часто такие изменения магнитного поля не сопровождаются вспышками.

2. Постепенное накопление магнитной энергии в переходной области хромосфера/корона до 10^{23} — 10^{24} Дж требует увеличения напряженности магнитного поля до 40—50 мТл в объеме $6 \cdot 10^{28}$ см³. Магнитное давление в этих местах на 2–3 порядка превышает давление окружающей среды. Что удерживает накопленную энергию?

3. Не ясен механизм быстрого переноса и реализации энергии в относительно малом объеме вспышки. Еще в 1971 г. С. А. Каплан, С. Б. Пикельнер и В. Н. Цитович [2] обратили внимание на то, что плазма с накопленной энергией должна успеть отдать ее за короткое время импульсной фазы вспышки, для этого она должна двигаться со скоростью света, что явно исключено.

4. Особые трудности возникают, если учесть тонкую филаментарную структуру магнитных трубок потока. В работе [14] рассмотрена трехмерная модель столкновения магнитных трубок потока. Оказалось, что при столкновении магнитных трубок разной полярности имеет место упругое столкновение, либо происходит простая деформация трубок, либо в местах их пересечения реализуется только малая доля энергии.

5. В сложных АО многие вспышки идут сериями гомологических, подобных вспышек. Это требует сохранения структуры поля или быстрого ее восстановления. Последнее невозможно из-за большой самоиндукции токов АО.

Эти трудности заставляют искать альтернативные подходы в решении проблемы энергетики вспышек. Такой подход связан с необходимостью учета нелинейных явлений в замагниченной солнечной плазме, с процессами локализации дискретных магнитно-плазменных структур. Такая попытка была предпринята одним из авторов (Э. И. Могилевским [5]) при использовании понятия МГД-солитонов. С тех пор появилось огромное количество новых данных наблюдений с высоким пространственно-временным разрешением, полученных на космических аппаратах TRACE, «Yohkoh», SOHO. В работе [4], например, сделана новая попытка построения солитонной модели вспышек. Анализировалось нелинейное параболическое уравнение, дающее солитонное решение тепловых дискретных мелко-масштабных структур высокой температуры ($\geq 20 \cdot 10^6$ К) на Солнце. Использовались данные наблюдений «Yohkoh» двух вспышек.

Здесь мы пытаемся обосновать реальность МГД-солитонов солнечных вспышек, используя некоторые материалы наблюдений TRACE, взятые из Интернет.

НЕКОТОРЫЕ ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СОЛИТОНАХ

Солитоны — одиночные импульсные слабо затухающие волны, возникающие в различных нелинейных средах со слабой дисперсией в низкочастотном или высокочастотном спектральных диапазонах. В нашем случае — это замагниченная плазма на всех высотах Солнца. Солитоны, в отличие от линейных волн, не интерферируют, не дифрагируют и своим поведением напоминают частицы. Солитоны иногда создают пары, если в их структурах имеется пульсирующий «хвост». Солитоны описываются нелинейными дифференциальными уравнениями, характеризующими эволюцию возмущений данной среды.

Образование МГД- солитонов в подфотосферной и фотосферной замагниченной плазме (т. е. при факторе $\beta = E_{\text{кин}}/E_{\text{маг}} = 4\pi mV^2/B^2 > 1$) может быть связано с распространением звуковой волны, которую возбуждает всплывающий субконвективный элемент (вихрь Хилла) в канале между конвективными ячейками. В данном случае имеет место нелинейность на высоких частотах. В среде с уменьшающейся плотностью дисперсионное уравнение с отрицательной слабой дисперсией согласно [8] имеет вид

$$\omega = c_0 k - bk^3 + \dots, \quad (1)$$

где c_0 — фазовая скорость, k — волновой вектор, b — постоянная. Таким образом, под фотосферой есть условия для генерации устойчивых солитонов. В процессе распространения волны происходит компенсация нелинейного опрокидывания волны отрицательной дисперсией. В системе координат, которая движется с фазовой скоростью c_0 , имеет место нелинейное уравнение Кортевега — де-Вриза [8]

$$U_t + UU_x + bU_{xxx} = 0. \quad (2)$$

Решением этого уравнения является солитон

$$U = U_0 \text{ch}^{-2}[(x-c_0)/\Lambda], \quad (3)$$

где U — магнитный вектор, Λ — ширина солитона.

В солнечной хромосфере $\beta < 1$; в этом случае имеет место нелинейность на низких частотах. Тогда вместо уравнения Кортевега — де-Вриза солитонное решение даст уравнение Син-Гордона, характеризующее возмущение, идущее по цепочке связанных осцилляторов. В нашем случае это может быть совокупность фрактальных элементов, колебания которых происходят перпендикулярно к оси цепочки. Решением уравнения Син-Гордона

$$U_{tt} - c^2 U_{xx} + U_0^2 \sin U = 0 \quad (4)$$

является солитон

$$U = 4 \arctg \exp(w_0 \gamma \xi / c), \quad (5)$$

где $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$, а ξ — текущая переменная. Это уравнение соответствует так называемому кинк-солитону. Уравнение Син-Гордона дает не только односолитонное решение, но и многосолитонное. Каждый солитон является частью сферы вращения постоянной кривизны.

При всплытии вихря Хилла вдоль магнитной стенки (границы ядра пятна) должны появляться двумерные МГД-солитоны. Б. Б. Кадомцев и В. И. Петвиашвили [1] получили двумерное параболическое уравнение возмущения замагниченной плазмы, решением которого являются двумерные солитоны. В. И. Петвиашвили и О. А. Похотелов [7] показали, что устойчивость солитонных конфигураций повышается, когда альвеновские и магнитно-звуковые волны взаимодействуют друг с другом, «зацепляются» друг за друга при образовании солитона. Получены численные решения [7], показывающие, что двумерные солитоны образуют связанные состояния в виде периодической двумерной решетки,двигающейся как целое.

Хотя мы не можем определить однозначно тип солитонов, ответственных за энергетику вспышки, многие свойства мелкомасштабных структур, называемых нами в дальнейшем «вкраплениями» (в англоязычных источниках — *blobs*), напоминают свойства солитонов. Солитоны всех типов имеют некоторые общие свойства.

РЕЗОНАНСНЫЙ ДУБЛЕТ С IV 155 НМ

Справедливость обсуждаемой солитонной гипотезы требует детального знания параметров процессов на всех высотах солнечной атмосферы. Прямые исследования глубинных слоев при волновом зондировании пока еще не достаточны. Можно принять гипотезу Паркера [15, 16] о всплывании Ω -образных магнитоплазменных структур, несущих энергию, реализующуюся в АО. Однако экспериментального подтверждения гипотезы пока нет. Значительно большую информацию о более высоких слоях солнечной атмосферы можно получить в настоящее время из материалов наблюдения в УФ-лучах по наблюдениям на КА TRACE [13]. С помощью ряда узкополосных фильтров в УФ-области и высокочувствительных многоэлементных приемных матриц получают фильтрограммы в корональных линиях λ 17.1 нм (Fe X/Fe IX) и 19.5 нм (Fe XIII). С фильтром полосы 3.7 нм в области 155—160 нм на TRACE получают кинофильмы вспышек в линии С IV. Резонансный дублет С IV λ 154.82 и 155.08 нм соответствует температуре 10^5 К, его эмиссия должна относиться к нижней границе переходной зоны.

В работе [12] изучались изображения активной области и вспышки в нескольких длинах волн. Обнаружено, что детали событий наиболее контрастны в линиях С IV: основной пик яркости вспышки соответствует увеличению яркости по сравнению с фоном в этой линии в 10 раз, в то время как в линиях $\lambda\lambda$ 17.1 и 19.5 нм — в 2 раза. Наблюдения в резонансном дублете С IV наиболее перспективны для обнаружения мелко-масштабных структур как в активных, так и в спокойных областях Солнца.

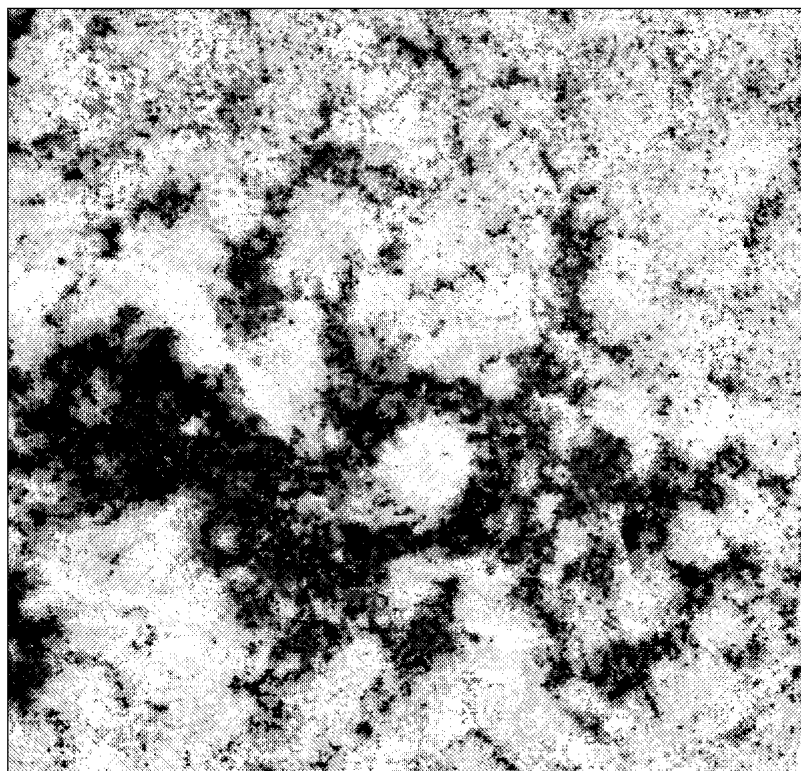


Рис. 1. Фильтрограмма TRACE С IV 28 ноября 2000 года возле активной области 9240 N09W02

НЕКОТОРЫЕ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ СОЛНЦА БЕЗ ВСПЫШЕК

Рассмотрим негативный снимок в линии 155 нм в районе активной области (рис. 1). По всему полю вне АО видно множество ярких точек размером 1000 км и менее. При просмотре ряда последовательно полученных снимков видно, что эти мелкие объекты (фракталы) очерчивают границы супергранул. Фракталами называют самоподобные взаимодействующие элементы, способные образовывать кластеры разного масштаба. В этом случае кластерами являются границы супергранул. Подробнее о фракталах на Солнце см. в работе [6]. Сравнение фильтрограммы С IV возле пятна в центре диска и соответствующей магнитограммы, полученной MDI SOHO, показывает полное подобие размеров и структуры поля. Это свидетельствует о вертикальности магнитных силовых линий на значительном интервале высот. Супергрануляционная структура выделяется столь же контрастно, как и в Са II. Бергер и др. [11] также заметили сходство структур невозмущенной атмосферы в линии С IV и магнитограмм MDI SOHO.

Флоккулы на фильтрограммах С IV показывают фрактальные структуры размером около 1000 км, образуя явление, называемое в последнее время термином «мох» (moss) [10]. Над яркими точками флоккула в линии λ 17.1 нм такого размера располагаются дуги фильтрограмм «Yohkoh». Эти ячейки «мохов» имеют температуры $(0.6—1.6) \cdot 10^6$ К, давление 0.7—1.7 дин, что раза в два превышает давление невозмущенной короны; скорости перемещения ярких ячеек близки к 50—100 км/с. В работе [9] подчеркивается, что нагрев петель и давление в их основаниях определяются более хромосферными, чем корональными процессами. По данным [13] вспышки на фильтрограммах $\lambda = 17.1$ нм состоят из многочисленных тонких структур.

МЕЛКОМАСШТАБНЫЕ СТРУКТУРЫ
В ПЕРВЫЕ МОМЕНТЫ ПОЯВЛЕНИЯ ВСПЫШЕК

Рассмотрим первые моменты небольшой вспышки C2.4 6 декабря 2000 г. в прилиббовой зоне по кинофильму в линии С IV, 1247-1254-1259 UT. Интервал между кадрами фильма — 30 с. В первые две минуты вспышка выглядела как спираль с рядом малых ярких элементов (вкраплений) в ее узлах и протяженным свечением на вершине (рис. 2). Размеры ярких точек близки к размерам ярких точек «мохов». Через две минуты конфигурация спирали изменилась: внутри первой появилась вторая спираль меньшего сечения, узлы которой поднимались со скоростью 150 км/с. В результате произошел общий подъем всей структуры. Мы полагаем, что в этой вспышке мы наблюдаем не только отдельные солитоны, но и их расположение на некоторой жесткой пространственной решетке, изменяющейся со временем.

Рассмотрим поведение изучаемых структур в окрестности больших пятен. По периметру больших пятен в С IV наблюдается непрерывное истечение ярких элементов по направлению от центра пятна. Количество таких выбросов и их яркость резко увеличиваются перед вспышкой. Последнее было заметно при появлении одной из протонных вспышек 24 ноября 2000 г. В АО 9236 в этот день произошли три мощных вспышки — X2.0/3B, X2.3/2B, X1.8/2N. Эта область изучалась международной программой MEOS, поскольку в ней же 25 ноября произошли вспышки M3.5/2N, X1.9/2B, а 26 ноября — M2.2/1F, X4.0. Область состояла из большого пятна с активным вытянутым ядром S полярности напряженности 0.26 Тл. Из внешней границы тени большого пятна происходил выброс ярких дискретных плазменных образований размером порядка 1000 км (вкраплений). 23—24 ноября в западной части пятна всплывало новое поле

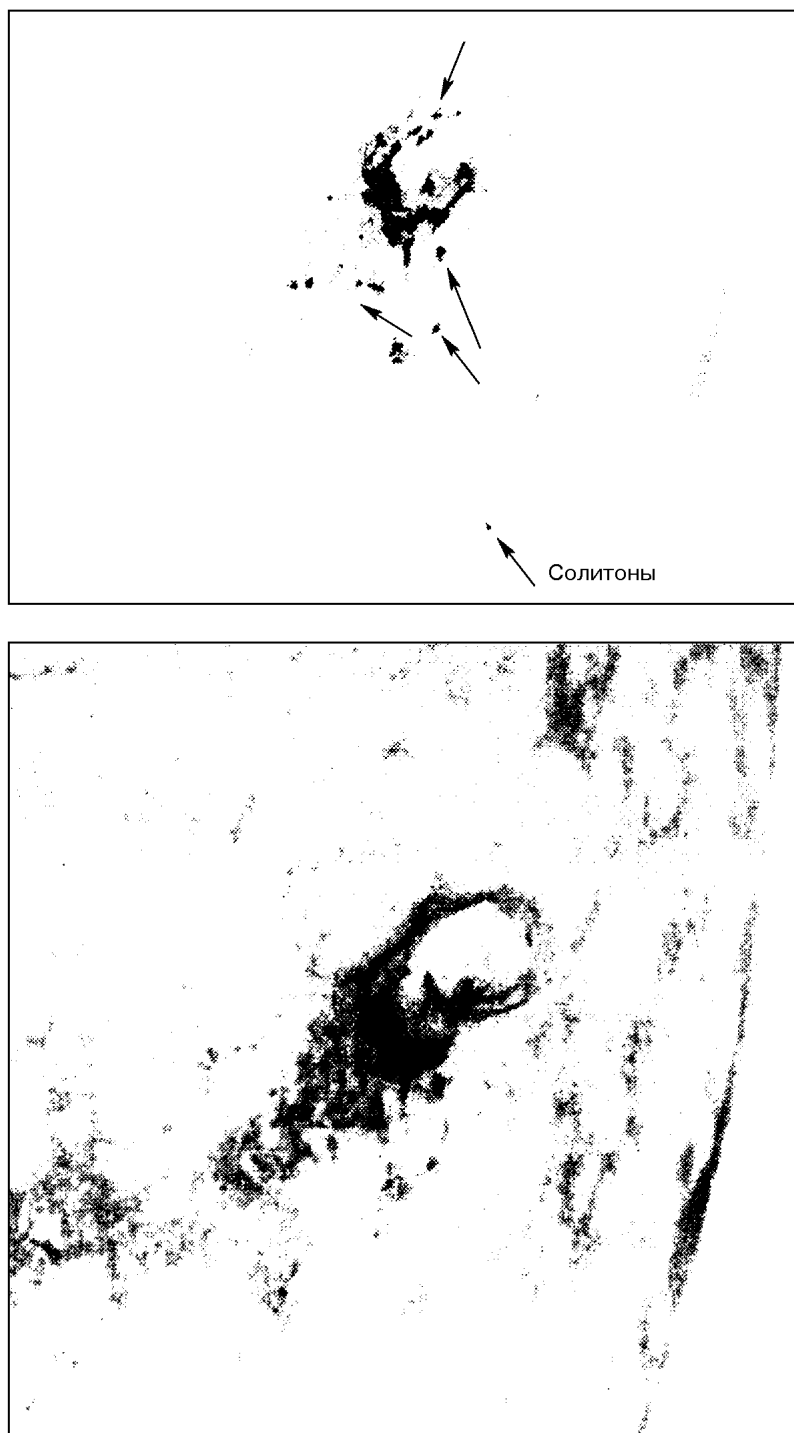


Рис. 2. Фильтрограммы TRACE C IV вспышки SF/C2.4, активная область S11W62 6 декабря 2000 г.

S-полярности. Однако только мелкомасштабные структуры наглядно показывали возникновение новых участков поля или его перераспределение. В $13^{\text{h}}28^{\text{m}}$ UT в тени пятна возник яркий выброс, через 5 мин их стало два, через 30 мин — три, а еще через 48 мин один из них «лопнул», увеличив площадь своего свечения, и дал начало вспышке X2.3/2B. Вкрапления, не

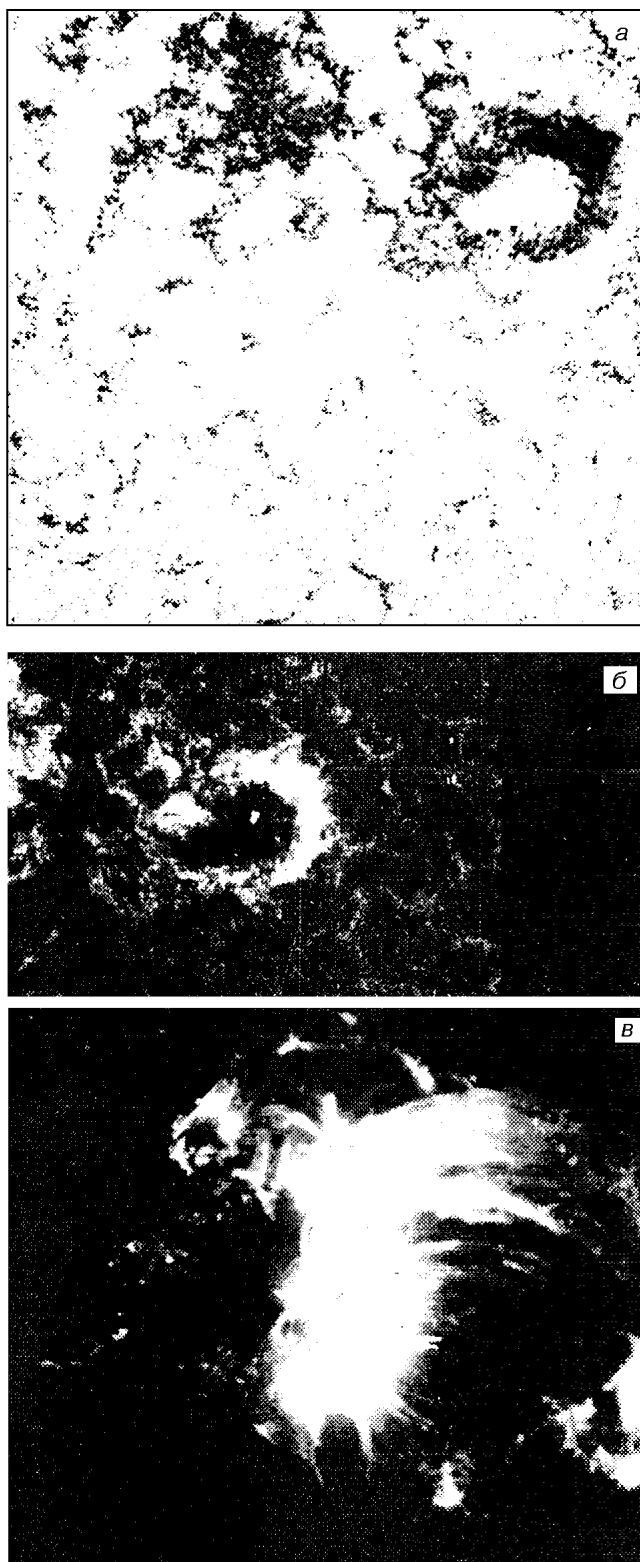


Рис. 3. Фильтрограммы TRACE C IV 24 ноября 2000 г.: *a* — яркие точки границы тени пятна области вспышек МЕОС в 01^h07^m UT; *б* — яркие точки в центре пятна перед вспышкой; *в* — вспышка 2В/X2.3

взаимодействуя, следовали окружающему магнитному полю и образовали яркое светящееся кольцо вокруг пятна (рис. 3). Рваная структура светящегося кольца вспышки отражает участие индивидуальных солитонов в ее формировании. Характерна локальность выхода энергии: в восточной не затронутой вспышкой половине пятна частота возникновения выбросов была существенно меньше. Яркие выбросы существовали гораздо меньшее время, чем слабо светящиеся. Эта вспышка, как и вспышка 6 декабря 2000 г., показывала выход мелкомасштабных элементов в поле одной полярности. Цепочка ядер N-полярности у кромки юго-западной границы почти не задевалась эмиссией. Это исключает процесс магнитного пересоединения как источник энергии вспышки. То же свойство можно было отметить у вспышки в тени одного большого пятна 5 августа 2001 г. на фильтрограммах C IV. В этом случае наблюдалось головное пятно области 9557 N-полярности, к которому примыкала цепочка мелких пятен S-полярности. Все свечение субвспышек 1526-1533-155 и 1503-1504-1517 UT накладывалось на головное пятно, его строение было сложным с глубоко входящими мостами.

Заметим, что фрагменты яркости (вкрапления) можно фиксировать только в первые моменты свечения вспышки, не позднее пяти минут после ее начала, во всяком случае до максимума вспышки, когда свечения отдельных фрагментов уже сливаются.

Если вспышка располагалась далеко от лимба и если она наблюдалась только на фильтрограммах в линии λ 17.1 нм, то для увеличения контраста мы строили так называемые разностные изображения, когда из каждой фильтрограммы вычитается предыдущая фильтрограмма кинофильма (рис. 4). Проиллюстрируем появление мелкомасштабных структур на таких изображениях у двух вспышек. На фильтрограмме TRACE λ 17.1 нм вспышка 3B 6 июня 2000 г. N10E18, 1206-1521-1843 UT, в 12^h06^m—12^h09^m

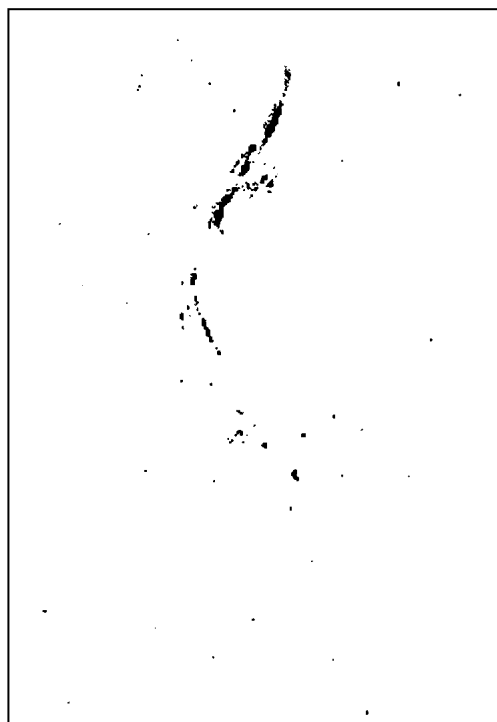


Рис. 4. Разностная фильтрограмма 17.1 нм TRACE в первые моменты вспышки 3B 1206-1521-1843 UT 6 июня 2000 г., N10E18

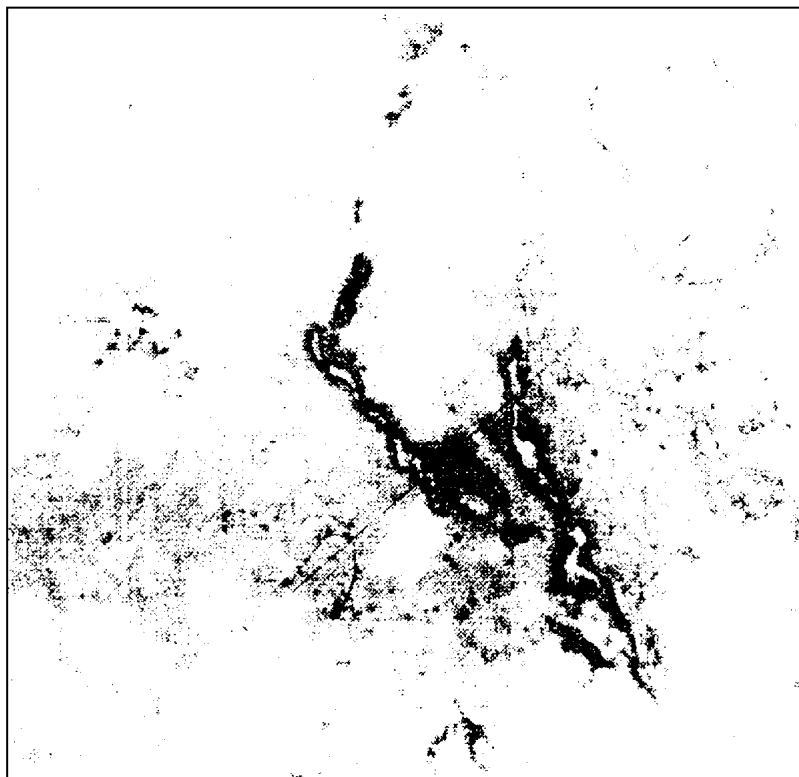


Рис. 5. Разностная фильтограмма TRACE C IV в первые моменты вспышки 2F/M1.2 20 января 2001 года S07E40

УТ выглядит как цепочка нескольких десятков фрагментов вблизи и вдоль трассы волокна (рис. 4). На фильтограммах C IV две ленты вспышки M1.2/2F 20 января 2001 г., 1840-1853-2002 UT, в области S07E40 в 18^h42^m UT отчетливо показывают фрагментарную структуру, каждая деталь которой, по-видимому, состоит из нескольких мелкомасштабных фрагментов (рис. 5).

Солитоны каждой из лент двухленточной вспышки при этом появляются из разных мест и часто не одновременно, хотя и близко по времени.

СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ ВКРАПЛЕНИЙ (BLOBS) И СОЛИТОНОВ ВО ВСПЫШКЕ

Перечислим признаки мелкоструктурных образований вспышки, свидетельствующие в пользу того, что они имеют солитонную природу.

Во вспышке 6 декабря видна решетка, в узлах которой светятся вкрапления. Если последовательности вкраплений возникают во вспышке через 2-3 мин, то их динамика во флоккуле дает период около 30 мин.

Вкрапления демонстрируют одно из основных свойств солитонов: чем больше их яркость, тем быстрее они «лопаются».

При вспышках у большого пятна вынос вкраплений сопровождается изменением формы пятна, что говорит в пользу подфотосферного происхождения этих структур.

При выбрасывании вкрапления распространяются, следуя влиянию магнитного поля, вдоль трассы H_α -волокна. Вкрапления не взаимодействуют между собой, хотя прилипают при образовании пар.

Скорость движения вкраплений менее 200 км/с. Это близко к величине магнитозвуковой скорости в атмосфере Солнца. Такую скорость должны иметь узлы солитонов согласно уравнению Син-Гордона.

Совокупность взрывающихся вкраплений определяет ленты вспышки. Так, во вспышке 24 ноября 2000 г. видно, что изрезанные границы эмиссии вспышки представляют тонкие ответвления от высвечивающихся отдельных вкраплений (рис. 3).

Для уединенной волны в плазме фазовая и групповая скорости близки к дрейфовой скорости плазмы [7]. При этом образовавшиеся солитоны распределяются в пространстве так, что их скорость уменьшается с увеличением угла между волновым вектором и вектором магнитного поля. Это приводит к концентрации солитонов у линии смены знака магнитной полярности. В нашем случае в двух ленточных вспышках вкрапления двигались вдоль и вблизи трассы волокна, т. е. вдоль линии смены знака поля.

Мелкомасштабные элементы вспышек располагаются и взрываются на фоне магнитного поля одной полярности, что делает невозможным интерпретацию этого явления как процесса магнитного пересоединения.

Если E_s — полная энергия солитона с основанием Λ , то основное свойство солитона можно представить простым выражением

$$E_s \Lambda = \text{const.} \quad (6)$$

Чтобы убедиться в том, что МГД-солитоны могут быть необходимыми носителями энергии вспышек, рассмотрим солитон на фотосферном уровне. Его энергия, согласно работе [3], равна

$$E_s \approx \pi/3 E_m c_s \Lambda^2, \quad (7)$$

где E_m — плотность магнитной энергии, c_s — скорость солитона. Проведем грубую оценку энергии солитона. При $B = 50$ мТл в активной области, $c_s = 1.5 \cdot 10^7$ см/с и $\Lambda = 5 \cdot 10^8$ см получаем $E_s \approx 10^{21}$ Дж. Для всей энергетики вспышки потребуется 100—1000 солитонов. Основная часть энергии вспышки излучается в видимой и УФ-областях спектра.

Солитоны проявляют себя и как волна, и как совокупность частиц. Для их цепочек характерен корпускулярно-волновой дуализм. Два солитона слипаются через взаимодействие излучением, баланс массы и энергии возможен только при учете радиационных компонентов.

Оценим общую массу солитонов, приравняв суммарную энергию и кинетическую энергию их потока:

$$\sum E_s = \sum 0.5 M C_g^2 C_g \delta t. \quad (8)$$

При $\delta t = 1000$ с, энергии вспышки 10^{24} Дж и групповой скорости плазмы $C_g = 10^6$ см/с получаем общую массу потока солитонов $M = 10^{10}$ г, массу одного солитона 10^8 г, что при объеме 10^{24} см³ дает плотность 10^8 част./см³. Последняя оценка соответствует корональной плотности, что не удивительно при наблюдении в резонансном дублете C IV.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные выше материалы наблюдения вспышек в УФ-области с высоким пространственным разрешением на космическом аппарате TRACE убеждают в том, что энергоносителями вспышек являются солитоны. Эта новая концепция, естественно, требует дальнейших исследований. Для обоснования адекватности солитонной модели всему сценарию вспышек

необходимо уточнить, где и когда появляются солитоны определенного типа. Определение типа солитона требует кинофильмов с разрешением около 0.1 с. Настоящая работа может помочь развитию этого нового этапа в изучении солнечных вспышек.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 00-02-16090, 00-02-17736, 01-02-16307) и Российской программы «Астрономия».

1. Кадомцев Б. Б. Коллективные явления в плазме. — М.: Наука, 1988.—163—165 с.
2. Каплан С. А., Пикельнер С. Б., Цитович В. Н. Физика плазмы в солнечной атмосфере. — М.: Наука, 1977.—111 с.
3. Карпман В. В., Маслов О. О структуре ближней зоны и резонансных конусов осциллирующих диполей в магнитоактивной плазме // Журн. эксперим. и теор. физики.—1987.—93, вып. 5.—С. 1696—1705.
4. Ковалев В. А., Чернов Г. П., Ханаока И. Мелкомасштабная структура во вспышечной области // Письма в астрон. журн.—2001.—27, № 4.—С. 1—11.
5. Могилевский Э. И. Структуризация вспышечной области и солитонная модель первичного источника энергии и вещества в солнечных вспышках // Кинематика и физика небес. тел.—1986.—2, № 2.—С. 75—82.
6. Могилевский Э. И. Фракталы на Солнце. — М.: Наука, 2001.—152 с.
7. Петвиашвили В. И., Похотелов О. А. Уединенные волны в плазме и атмосфере. — М.: Энергоиздат, 1989.—139 с.
8. Рыскин Н. М., Трубецкой Д. И. Нелинейные волны. — М.: Наука, 2000.—268 с.
9. Auchwander M., Nightinabe K. W., Alexander D. Evidence for nuniform heating of coronal loops infered from multithred modeling of TRACE data // Astrophys. J.—2000.—541, N 1.—P. 1059—1079.
10. Berger T. E., De Pontieu B, Flecher L. J., et al. What is «moss»? // Solar Phys.—2000.—190, N 1/2.—P. 400—418.
11. Berger T. E., Schrijver C. J., Title A. U. Dynamic of transition region «moss» in the high time resolution // Solar Phys.—2000.—190, N 1/2.—P. 419—435.
12. Gallahan P. T. Williams D. R., Philligs K. J. H., et al. Multi-wavelength observations of the 1998 September 27 flare spray // Solar Phys.—2000.—195, N 2.—P. 367—380.
13. Handy B. W., Brunner M. E., Tarbell I. D., et al. UV-observations with the transition region and coronal explorer // Solar Phys.—1998.—183, N 1.—P. 29—43.
14. Kondraschov D., Flynnman J., Liener J., Rusmakina A. A. Three-dimensional MHD simulation on interaction magnetic flux tubes // Astrophys. J.—1999.—519, N 1.—P. 884—898.
15. Parker E. N. Theoretical properties of Ω -loops in the convective zone of the Sun. I. Emerging bipolar magnetic regions // Astrophys. J.—1994.—433, N 2.—P. 867—874.
16. Parker E. N. Theoretical properties of Ω -loops in the convective zone of the Sun. II. The origin of enhanced solar irradiance // Astrophys. J.—1995.—440, N 1.—P. 415—420.
17. Sturrock A. A., Holzer T. E., Milholas D. M., Ulrich R. R. Physics of the Sun. — London: D. Reidel Publ. Co., 1986.—285 p.

Поступила в редакцию 07.01.02