

УДК 523.98

Модель внепятенной вспышки

А.В. Боровик, Д.Ю. Мячин, А.М. Уралов

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, 664033
myachin@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 2 ноября 2015 г.

Аннотация. В настоящее время наиболее разработанной моделью солнечной вспышки является “стандартная” модель “CSHKP”, которая объединяет многочисленные имеющиеся наблюдательные и теоретические схемы. Модель “CSHKP” достаточно хорошо описывает завершающую фазу солнечной вспышки – фазу расходящихся вспышечных лент, однако она не применима к начальной фазе вспышки, в том числе к появлению первичных вспышечных лент над линией инверсии фотосферного магнитного поля. В работе приводятся данные анализа крупных статистических исследований солнечных вспышек за последние сто лет. Используются качественные наземные наблюдения солнечной хромосферы в линии H_{α} Байкальской астрофизической обсерватории и данные по магнитному полю обсерватории Китт-Пик (США) для внепятенной солнечной вспышки 16 марта 1981 г., имеющей ряд особенностей, которые невозможно было объяснить в рамках “стандартной” модели. На основе полученных данных и анализа имеющихся в литературе теоретических моделей солнечных вспышек, в том числе модели “CSHKP”, предлагается эмпирическая модель внепятенной солнечной вспышки.

MODEL OF THE SUNSPOTLESS FLARE, *by A.V. Borovik, D.Yu. Myachin, A.M. Uralov.* The model CSHKP well enough describes a finishing phase of solar flare – a phase dispersing flare ribbons, however it is not applicable to an initial phase of the flare, including to occurrence of primary flare ribbons over an inversion line of the photospheric magnetic field. Data of the analysis of large statistical researches of solar flares for the last hundred years are cited in the paper. We used observational data of the solar chromosphere in the H_{α} lines taken at the Baikal Astrophysical Observatory (BAO) and magnetic field data obtained at the Kitt Peak Observatory (USA). We present a model of the sunspotless solar flare on the basis of the acquired data and analysis of theoretical models of the solar flares available in the literature, including model CSHKP. The model allows us to explain the main stages of development of the flare and observed “phenomenon” – extended bright chromospheric “streamer” over the polarity reversal line section of the longitudinal magnetic field.

Ключевые слова: солнечная активность, внепятенные солнечные вспышки

1 Введение

В настоящее время общепризнано, что солнечные вспышки возникают из-за присутствия электрических токов, протекающих в корональной плазме солнечных активных областей. Появление этих токов связано с выходом магнитных полей на солнечную поверхность и сопровождается движениями фотосферной и хромосферной плазмы. С токами связана избыточная, или не

потенциальная, составляющая магнитного поля. Из-за высокой электропроводности и больших пространственных масштабов (индуктивности) магнитное поле оказывается “вмороженным” в солнечную плазму. Поэтому быстрое вспыхивающее высвобождение избыточной магнитной энергии невозможно, если оставаться только в рамках представлений об обычной омической диссипации электрических токов. Решающими факторами являются магнитогидродинамические неустойчивости, обусловленные сложившейся в ходе эволюции неоднородностью корональных токов, а также магнитное пересоединение в узких токовых слоях. Совместное действие этих факторов, по-видимому, обеспечивает эффективное преобразование накопленного в магнитосфере активной области избытка магнитной энергии в энергию излучения, энергичных частиц и гидродинамических движений плазмы.

Большинство солнечных вспышек, в том числе крупных и мощных, происходит в активных областях, где магнитное поле в результате развития центра активности приобретает сложную магнитную конфигурацию. Однако вспышки могут происходить и в областях без пятен, что указывает на существование особых ситуаций, которые при определенных условиях могут привести к возникновению внепятенной солнечной вспышки. Согласно проведенному анализу крупных статистических исследований солнечных вспышек за последние сто лет (табл. 1), установлено, что средняя доля внепятенных вспышек составляет 4 % от общего числа всех вспышечных событий на Солнце. Пересчитав средневзвешенное значение по следующей формуле:

$$P_{\text{ср}} = \sum_i P_i N_i / \sum_i N_i$$

получим $P_{\text{ср}} = 2\%$, что также подтверждает результат самой репрезентативной выборки, выполненной в работе (Барлас и Алтас, 1992), и очень малой доли внепятенных вспышек от общего числа всех солнечных вспышек, происходящих на Солнце. Исследование внепятенных вспышек представляет большой интерес для понимания природы и механизмов вспышек в целом.

Таблица 1. Данные наиболее крупных статистических исследований

Исследователи	Временной интервал, гг.	N, количество исследованных вспышек	Внепятенные вспышки	
			n, количество	P, %
Richardson R.S. (Ричардсон, 1944)	1917–1943	593	24	4
Dodson Helen, Hedeman Ruth (Додсон, Хедеман, 1970)	1957–1964	1186	83	7
Чистякова К.Г., Чистяков В.Ф. (Чистякова, Чистяков, 1978)	1955–1964	431	21	4.9
Luo B. (Лу, 1981)	21 цикл	667	20	3
Чистяков В.Ф. (Чистяков, 1988; Чистяков, 1991)	21 цикл	11498	758	6.6
Barlas Ogyal, Altas Levent (Барлас, Алтас, 1992)	1947–1990	206850	4137	2
Yatini Clara Y. (Ятини, 2001)	1976–1999	81466	1222	1.5
Сумма		302691	6265	
Среднее значение				4
$P_{\text{ср}}$				2

Модель внепятенной вспышки

Наиболее разработанной моделью солнечной вспышки в настоящее время является модель “CSHKP”, объединяющая разные наблюдательные и теоретические схемы (Кармайкл, 1964; Старрок, 1966; Хираяма, 1974; Копп, Пнойман, 1976). Кармайкл в 1964 году разработал первый прототип модели (Кармайкл, 1964), полагая, что солнечный ветер открывает закрытые петли, формируя вертикальный токовый слой. Старрок (1966) усовершенствовал схему образования вспышечного токового слоя. В модели Коппа-Пноймана (1976) эрупция создает антипараллельную конфигурацию и последующее пересоединение с захватом вещества на замкнутых линиях поля. Согласно модели, предложенной Хираяма (1974), конфигурация магнитного поля перед вспышкой открытая, в нейтральном слое располагается протуберанец или корональные дуги. Хираяма предположил, что эрупция протуберанца играет ключевую роль в запуске магнитного пересоединения (рис. 1).

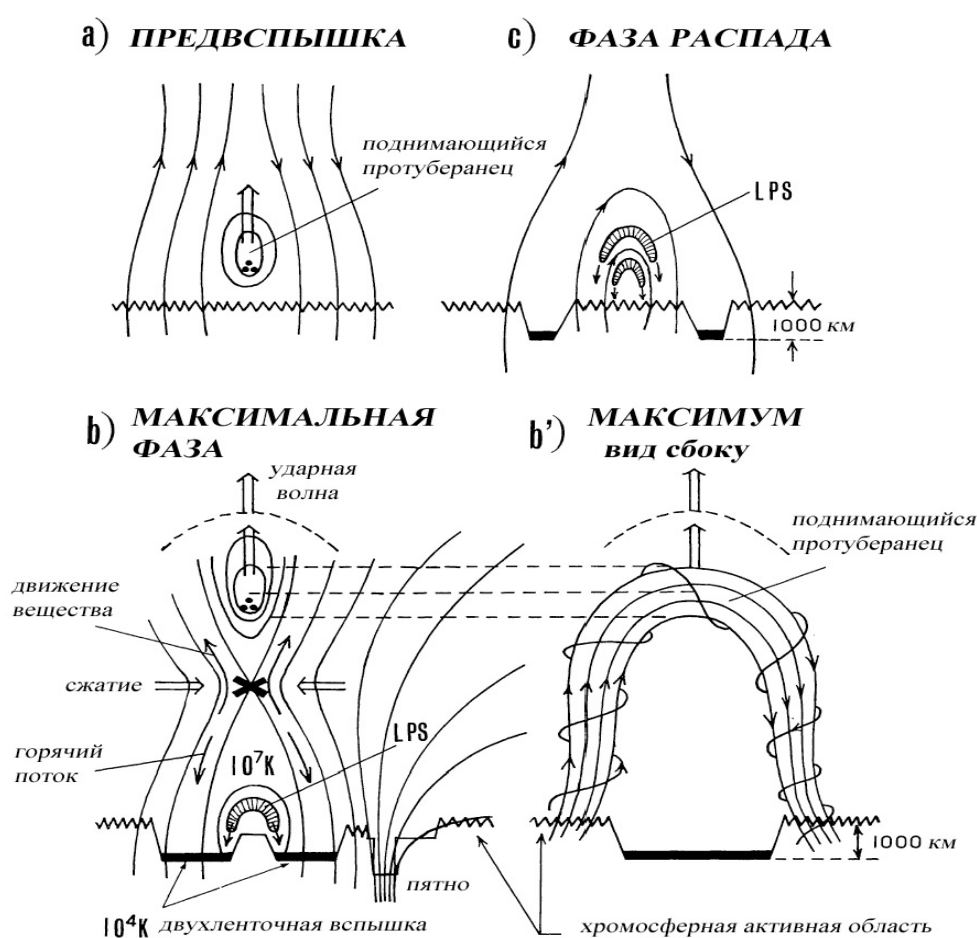


Рис. 1. Модель “хромосферного испарения” Хираямы. (а) – поднимающийся протуберанец, вызывающий пересоединение в X-точке (b). (b’) – вид протуберанца сбоку. (c) – хромосферное испарение горячей плазмы во вспышечных петлях (Хираяма, 1974)

Модель Хираямы одна из первых трехмерных, в которой обсуждаются “испарение хромосферы” и эрупция волокна. При этом вспышечная аркада начинает формироваться из нитей тела волокна, о чем в модели не сказано, но есть подтверждение по данным инструмента Atmospheric Imaging Assembly (Лемен и др., 2012) на борту космической обсерватории Solar Dynamics Observatory (SDO).

Шибата представил унифицированную модель (Шибата, 1998), согласно которой дополнительно к основной паре лент должны наблюдаться две светящиеся ленты, источником которых является плазмод, выбрасываемый в ходе 2-й активной фазы вспышки при пересоединении открытого магнитного потока (рис. 2).

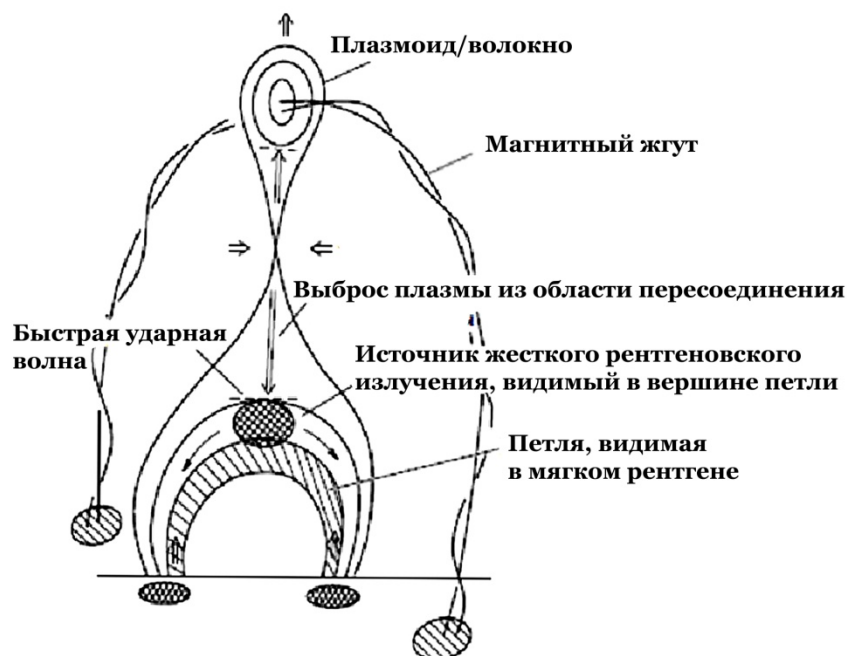


Рис. 2. Унифицированная схема стандартной вспышки. Рисунок взят из работы (Шибата, 1998)

Модель “CSHKP” – стандартная модель крупномасштабного магнитного пересоединения и в современных описаниях вспышечных процессов является доминирующей. Модель “CSHKP” неплохо описывает завершающую и, как правило, хорошо наблюдаемую фазу солнечной вспышки – фазу расходящихся вспышечных лент. Однако применимость этой модели к начальной фазе вспышки нельзя считать обоснованной. Это обстоятельство становится понятным, если учесть близость начальной фазы солнечной вспышки к практически ненаблюдаемому и до конца неясному моменту инициации всего вспышечного процесса.

2 Применимость “стандартной” модели

В исследовании Гречнева и др. (2015) появление первичных вспышечных лент или узлов над линией инверсии фотосферного магнитного поля может вообще не иметь прямого отношения к “стандартной” модели. В этом же исследовании сделана первая попытка стыковки наблюдательных проявлений солнечной вспышки до и после запуска “стандартной” схемы с использованием данных SDO (Лемен и др., 2012).

Еще одним примером является модель Уралова с соавторами (Уралов и др., 2002), в которой крупномасштабные волокна объединяются (рис. 3). Нити волокна вытягиваются и пересоединяются. Появляется вспышечный касп и ленты. Ранее стабильное волокно превращается в пружину и ускоряется вверх (рис. 4). После этого этапа начинает работать стандартная модель “CSHKP”.

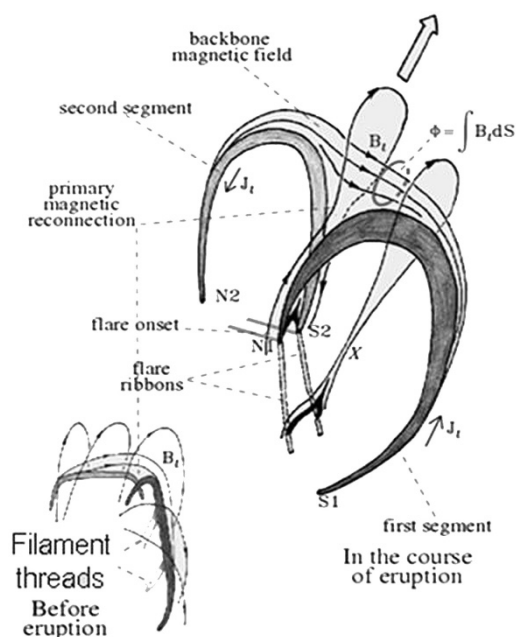


Рис. 3. Двухволоконная модель солнечной вспышки (Уралов и др., 2002)

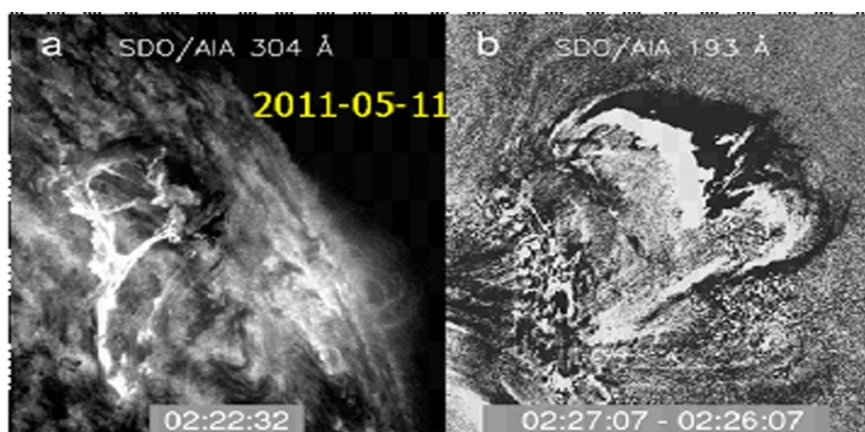


Рис. 4. Пример выброса вспышечного каспа

Подобные модели описаны также в работах Мура и Стерлинга с соавторами (Мур и др., 2001; Стерлинг и др., 2001). В отличие от “идеального” магнитного жгута (рис. 2) предвспышечное волокно связывается с фотосферой не только торцами, но и многочисленными нитями (или barbs, threads), которые крепятся большей частью вдоль линии раздела полярностей (ЛРП).

В работах Энгволда (2001) и Ауланье, Шмидера (2002) более подробно описаны геометрия и многонитевая структура волокон, их пространственно-временная эволюция, условия стабильности (рис. 5).

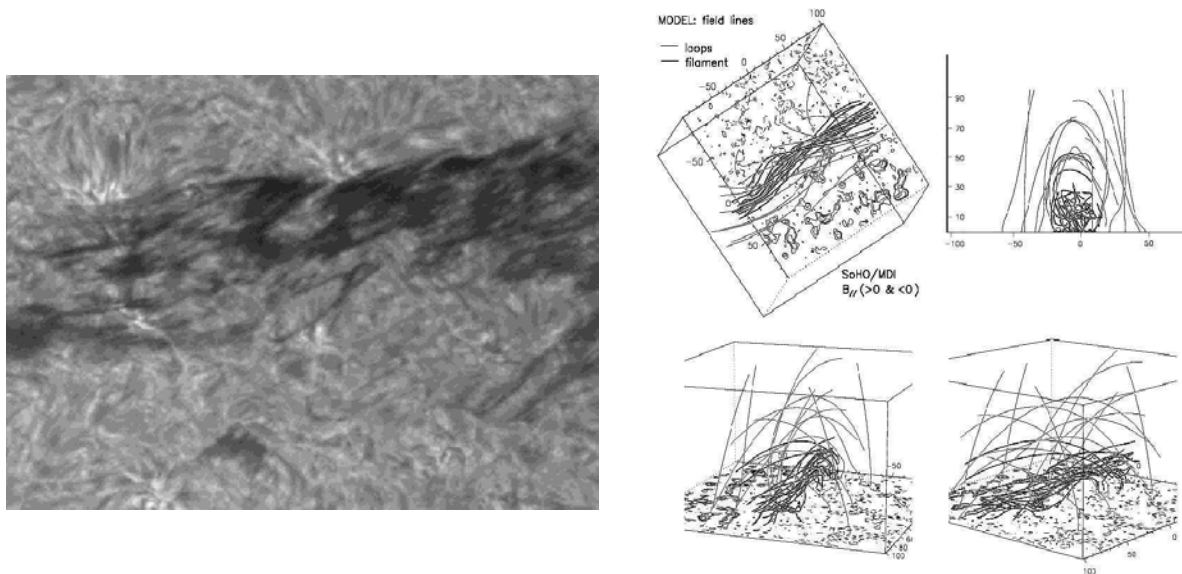


Рис. 5. Многопетлевая структура волокон. Рисунки взяты из работ (Энгволд, 2001; Ауланье, Шмидер, 2002)

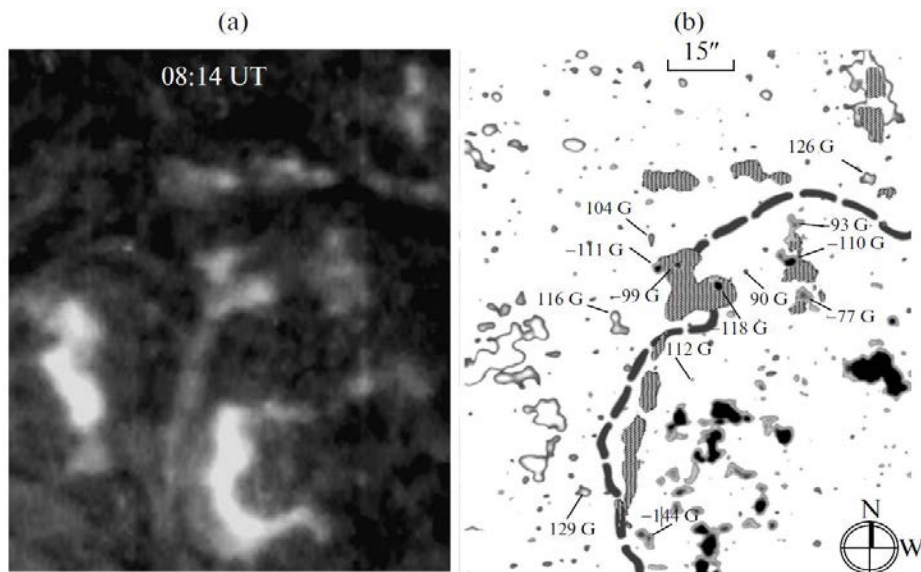


Рис. 6. (а) Внепятенная вспышка в линии H_{α} в 08:14 UT. (б) Магнитограмма и яркий “стример” (заштрихован)

Поднимающийся вверх магнитный жгут на рис. 2 (два его торца на поверхности Солнца представлены кружками) вытягивает магнитные силовые линии. Стрелки указывают возникающие сходящиеся течения плазмы, вносящие в область магнитного пересоединения поля противоположного направления. Вертикальные стрелки – течения плазмы после магнитного пересоединения. Внизу образуется вспышечная петля. Со временем процесс повторяется снова и снова. Над гаснущей первой вспышечной петлей (аркой) образуется вторая и т. д. В итоге основания вспышечных петель расходятся. На самом деле, вспышечных петель много, и они образуют аркаду, медленно растущую вверх. Основаниями вспышечной аркады являются теперь вспышечные ленты, расходящиеся от линии раздела магнитных полярностей.

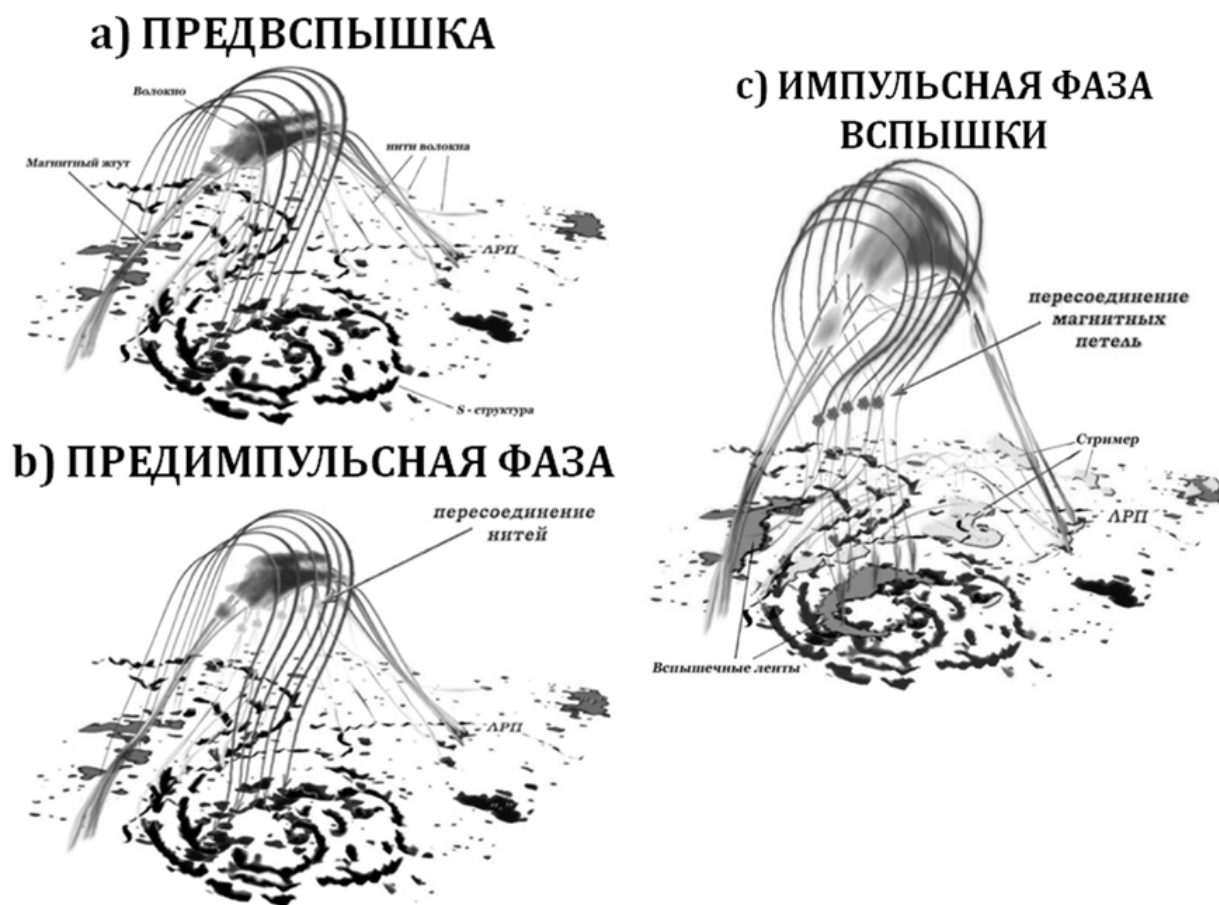


Рис. 7. Эмпирическая модель внепятенной вспышки. а) Расположение волокна перед внепятенной вспышкой. Волокно находится под магнитной аркадой, соединяющей холмы магнитного поля разной полярности. Тонкими линиями показаны многочисленные магнитные нити, оплетающие тело волокна и заканчивающиеся в окрестности ЛРП. б) Магнитное пересоединение нитей волокна перед импульсной фазой внепятенной вспышки. Волокно преобразуется в магнитный жгут. в) Продолжение внепятенной вспышки теперь соответствует “стандартной” модели. Идет магнитное пересоединение внешних магнитных аркад, которые увлекаются поднимающимся магнитным жгутом. Магнитные нити больше не связывают эруптивное волокно с фотосферой. Черным выделены волоконца, наблюдаемые в виде перевернутой буквы S. Отмечены “стандартные” вспышечные ленты и хромосферный стример, пробегающий вдоль ЛРП по основаниям магнитных нитей, в свое время связывающих предвспышечное волокно с фотосферой

В реальной ситуации на Солнце над ЛРП вместо магнитного жгута присутствуют магнитные структуры типа солнечных волокон (протуберанцев). Такое волокно над линией раздела полярностей существовало и в активной области перед вспышкой 16 марта 1981 г. (Боровик, Мячин, 2001). Непосредственно перед вспышкой в хромосфере в области будущих вспышечных лент возникла вихревая структура S-типа (Боровик, Мячин, 2002, 2011), свидетельствующая о присутствии на уровне фотосферы сдвиговых течений, увеличивающих непотенциальность магнитного поля. В работах (Боровик, Мячин, 2010; Боровик и др., 2014) можно найти подробное описание развития вспышки. Одной из особенностей вспышки 16 марта 1981 г. был необычный феномен – яркий вспышечный хромосферный “стример” – элемент вспышки, быстро распространяющийся вдоль линии раздела полярностей со скоростью порядка 400 км/с (рис. 6).

Для объяснения появления данного элемента внепятенной вспышки предлагается следующая эмпирическая модель вспышки (рис. 7). В отличие от “идеального” магнитного жгута, изображенного на рис. 2, предвспышечное волокно связывается с фотосферой не только торцами, но и многочисленными нитями (barbs, threads) (Лин и др., 2005), которые укореняются в самых разных местах хромосферы, но большей частью вдоль ЛРП. Перед вспышкой волокно, связанное с фотосферой многочисленными магнитными нитями, начинает медленно подниматься. Это приводит к вытягиванию нитей, их магнитному пересоединению (рис. 7b). В итоге образуется многократно скрученная спираль, которая начинает быстро подниматься вверх. Далее процесс идет в соответствии со стандартной моделью (рис. 7c).

Следует сказать, что в стандартной модели не хватает именно этапа пересоединения нитей, что могло бы объяснить появление вспышечного хромосферного “стримера”, т. е. магнитное пересоединение, но тех магнитных структур, которые были не над эруптивным волокном, а принадлежали самому волокну (рис. 7).

3 Заключение

Результатом настоящей работы является эмпирическая схема внепятенной вспышки, представленная эскизами на рисунке 7. Эмпирическая схема находится в согласии с результатами, полученными в исследованиях (Уралов и др., 2002; Гречнев и др., 2015). В рамках модели оказалось возможным объяснение ненаблюдаемого ранее явления хромосферного “стримера”, высокая скорость распространения которого вдоль раздела полярности продольного магнитного поля теперь увязывается со скоростью распространения волны “отрыва” эруптивного волокна от солнечной поверхности. Характерной особенностью события было усиление S-образной вихревой структуры накануне вспышки и ее ослабление после. Это обстоятельство, по-видимому, связано с топологической перестройкой магнитных потоков (через пересоединение нитей), составляющих структуру волокна до и после эрупции. Итогом такой перестройки явилась дестабилизация и выброс в корону электрического тока, протекавшего в волокне.

Авторы весьма признательны В.В. Гречневу за обсуждение статьи и полезные замечания.

Литература

- Ауланье, Шмидер (Aulanier G., Schmieder B.) // *Astron. Astrophys.* 2002. V. 386. P. 1106.
 Барлас, Алтас (Barlas O., Altas L.) // *Astrophys. Space Sci.* 1992. V. 197. N. 2. P. 337.
 Боровик А.В., Мячин Д.Ю. // *Избранные проблемы астрономии: Материалы III Всероссийской астрономической конференции “Небо и Земля”, посвященной 80-летию астрономической обсерватории ИГУ.* Иркутск: Изд-во ИГУ. 2011. С. 82.
 Боровик А.В., Мячин Д.Ю. // *Исследования по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца.* М.: Наука. 2001. Т. 113. С. 154.
 Боровик А.В., Мячин Д.Ю., Томозов В.М. // *Известия Иркутского государственного университета.* Серия: Науки о Земле. 2014. Т. 7. С. 23.
 Боровик, Мячин (Borovik A.V., Myachin D.Yu.) // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2010. V. 50. N. 8. P. 937.
 Боровик, Мячин (Borovik A.V., Myachin D.Yu.) // *Solar Phys.* 2002. V. 205. P. 105.
 Гречнев и др. (Grechnev V.V., Uralov A.M., Kuzmenko I.V., Kochanov A.A., Chertok I.M., Kalashnikov S.S.) // *Solar Phys.* 2015. V. 290. N. 1. P. 129.
 Додсон, Хедеман (Dodson Helen W., Hedeman E. Ruth) // *Solar Phys.* 1970. V. 13. P. 401.
 Кармайкл (Carmichael H.) // *Proc. Symp. Phys. of Solar Flares.* NASA-SP 50. 1964. P. 451.
 Копп, Пнойман (Kopp R.A., Pneuman G.W.) // *Solar Phys.* 1976. V. 50. N. 1. P. 85.

Модель внепятенной вспышки

- Лемен и др. (Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J., Boerner P.F., Chou C., Drake J.F., Duncan D.W., Edwards C.G., Friedlaender F.M., Heyman G.F.) // *Solar Phys.* 2012. V. 275. P. 17.
- Лин и др. (Lin Y., Engvold O., Rouppe van der Voort L.H.M., Wiik J.E., Berger T.E) // *Solar Phys.* 2005. V. 226. P. 239.
- Лу (Luo B.) // *Publications. Yunnan Observatory.* 1981. N. 3. P. 60.
- Мур и др. (Moore R, Sterling A.C., Hudson H.G., Lemen J.R.) // *Astrophys. J.* 2001. V. 552. P. 833.
- Ричардсон (Richardson R.S.) // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* 1944. V. 56. N. 331. P. 156.
- Старрок (Sturrock P.A.) // *Nature.* 1966. V. 211. P. 695.
- Стерлинг и др. (Sterling A.C., Moore R, Thompson B.J.) // *Astrophys. J.* 2001. V. 561. L219.
- Уралов и др. (Uralov A.M., Lesovoi S.V., Zandanov V.G., Grechnev V.V.) // *Solar Phys.* 2002. V. 208. P. 69.
- Хираяма (Hirayama T.) // *Solar Phys.* 1974. V. 34. N. 2. P. 323.
- Чистякова К.Г., Чистяков В.Ф. // *Солн. данные.* 1978. № 1. С. 76.
- Чистяков В.Ф. // *Исследования по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца.* 1988. Вып. 79. С. 70.
- Чистяков В.Ф. // *Солн. данные.* 1991. № 4. С. 91.
- Шибата (Shibata K.) // *Astrophys. Space Sci.* 1998. V. 264. P. 129.
- Энгволд (Engvold O.) // *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics / Ed. Paul Murdin. Institute of Physics Publishing.* 2001. P. 2695.
- Ятини (Yatini Clara Y.) // *National Institute of Aeronautics and Space of Indonesia Majalah LAPAN.* 2001. V. 3. P. 53.