

УДК 523.98

Динамические процессы в активной области в начальный и импульсный периоды эруптивного вспышечного события 7 июня 2011 года

А.Н. Бабин, А.Н. Коваль

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409
babin@crasrimea.ru

Поступила в редакцию 7 марта 2019 г.

Аннотация. Представлены результаты анализа H_{α} монохроматических и спектральных наблюдений впечатляющей эрупции волокна во время эруптивной вспышки 7 июня 2011 г., полученных в Крымской астрофизической обсерватории. Наземные наблюдения рассматривались совместно с наблюдательными данными, полученными на инструментах на борту Solar Dynamics Observatory (SDO/AIA, SDO/HMI). Изучена эволюция и динамика эруптивного процесса, причина эрупции, структура поля лучевых скоростей и тонкая внутренняя структура эруптивного волокна и определен ряд физических параметров в эруптивном волокне.

Результаты анализа показали следующее: 1. Эволюция эрупции волокна состояла из двух фаз: фазы медленного подъема, начавшейся примерно за два часа до начала вспышки, и фазы быстрого подъема, которая началась практически одновременно с началом вспышки. 2. Эруптивное волокно имело очень сложную внутреннюю структуру и сложное поле лучевых скоростей. Оно не выбрасывалось как единая структура. Эрупция состояла из нескольких крупных поглощающих фрагментов с большим количеством тонкоструктурных элементов внутри фрагмента с разными лучевыми скоростями, а также многих сгустков плазмы, оторванных от фрагмента. 3. Движение фрагментов представляло собой комбинацию вращательного движения вокруг оси фрагмента и движения в целом по направлению к наблюдателю. Определены скорости этих движений. 4. Профили линии H_{α} показывают большое разнообразие значений контраста, доплеровских полуширин и доплеровских смещений в элементах эруптивного волокна.

DYNAMIC PROCESSES IN AN ACTIVE REGION IN THE INITIAL AND IMPULSIVE PHASE OF THE ERUPTIVE FLARE EVENT ON JUNE 7, 2011, *by A.N. Babin and A.N. Koval*. We present the results of an analysis of H_{α} monochromatic and spectral observations of an impressive filament eruption during the eruptive flare on June 7, 2011 obtained at the Crimean Astrophysical Observatory. Our ground-based observations are combined with data acquired by multiple instruments onboard the Solar Dynamics Observatory (SDO/AIA, SDO/HMI). The evolution and dynamics of the eruptive process, the cause of eruption, the structure of the line-of-sight velocity field and fine internal structure of the eruptive filament are studied and a number of physical parameters in the eruptive filament are determined. The results of the analysis have shown that: 1) The evolution of the filament eruption consists of two phases: the slow-rise phase, which began about two hours before the flare onset, and the fast-rise phase, which began almost simultaneously with the start of the flare. 2) The eruptive filament had a very complex internal structure and complicated line-of-sight velocity field. The filament does not erupt as a single structure. Several discrete massive absorption fragments are seen with a large number of fine-structured elements

inside fragments with different velocities, as well as many plasma blobs that detach from the fragments. 3) The movement of the filament fragments is a combination of rotational movement around the axis of the main fragment and a bulk motion towards the observer as they erupt. The velocities of such plasma movements are determined. 4) H_{α} line profiles show a large variety of contrast values, Doppler half-widths and Doppler shifts in eruptive filament elements.

Ключевые слова: Солнце, солнечная активность, эруптивные волокна и вспышки

1 Введение

Наблюдения вспышек, полученные на Skylab (1973–1974 гг.), показали, что их можно разделить на два класса, отличающиеся глобальными формами магнитного поля, в которых они происходят (Pallavichini et al., 1977). В одних случаях вспышки появляются в системе петель, которые остаются закрытыми в течение всего явления. В других случаях силовые линии магнитного поля становятся открытыми и происходит выбрасывание магнитного поля и вещества в корону и межпланетное пространство эруптивным волокном и корональным выбросом массы (КВМ). Первый класс вспышек был назван компактными, второй – эруптивными. Термин “эруптивные вспышки” стал включать в себя не только двухленточные вспышки, но и эрупцию волокна и других корональных конфигураций (Svestka and Cliver, 1992). Механизмы, приводящие к выбрасыванию вещества и магнитного поля из солнечной атмосферы в межпланетное пространство, остаются невыясненными. Исследование динамики и структуры эруптивных явлений необходимо для определения физических процессов, приводящих к эрупции.

Данные о динамических явлениях в эруптивных вспышках получены в основном из наблюдений с фильтрами и часто ограничиваются изучением движений в картинной плоскости (Webb et al., 1976; McAllister et al., 1992, 1996; Khan et al., 1998). Спектральные наблюдения, дающие возможности определить лучевые скорости, немногочисленны (Kubota et al., 1992; Plunkett et al., 2000; Morimoto and Kurokawa, 2003). Чтобы установить механизм солнечных эрупций, нужно исследовать начальную стадию развития эрупции, так как наблюдения показывают, что активизация волокон начинается за некоторое время до начала импульсной фазы вспышки (Martin and Ramsey, 1972; Rust, 1976; De Jager and Svestka, 1985; Kahler et al., 1988). Как отмечено ранее (Martin, 1989), точность описания картины движений вещества и, следовательно, физическая интерпретация сильно зависит от качества наблюдений, то есть разрешения тонкой структуры.

В данной работе мы исследуем сложное эруптивное вспышечное событие 7 июня 2011 г., которое произошло в активной области (АО) NOAA 11226, координаты S20W55. Мы изучаем эволюцию и динамику эруптивного вспышечного процесса, исследуем структуру волокна, особенности поля лучевых скоростей и физических условий в эруптивном волокне в начальной и импульсной фазах вспышки на основании анализа высококачественных спектральных H_{α} -наблюдений, полученных на 53-см коронографе КГ-2 Крымской астрофизической обсерватории, с привлечением монохроматических H_{α} -наблюдений на коронографе КГ-1 и данных наблюдений Solar Dynamics Observatory (SDO) (Lemen et al., 2012; Scherrer et al., 2012).

2 Наблюдения и анализ

2.1 Характеристика события

Согласно наблюдениям GOES, вспышка балла 2N/M2.5 началась в 06:16 UT, достигла максимума в 06:41 UT и длилась около полутора часов. Изменение со временем потока рентгеновского излучения в полосе 1–8 Å (GOES-15) и микроволнового радиоизлучения на частоте 2.85 ГГц (Кацивели, КрАО) приведены на рис. 1. Вспышка была двухленточной, сопровождалась эрупцией волокна с выбросом огромного количества хромосферного вещества в корону, явилась

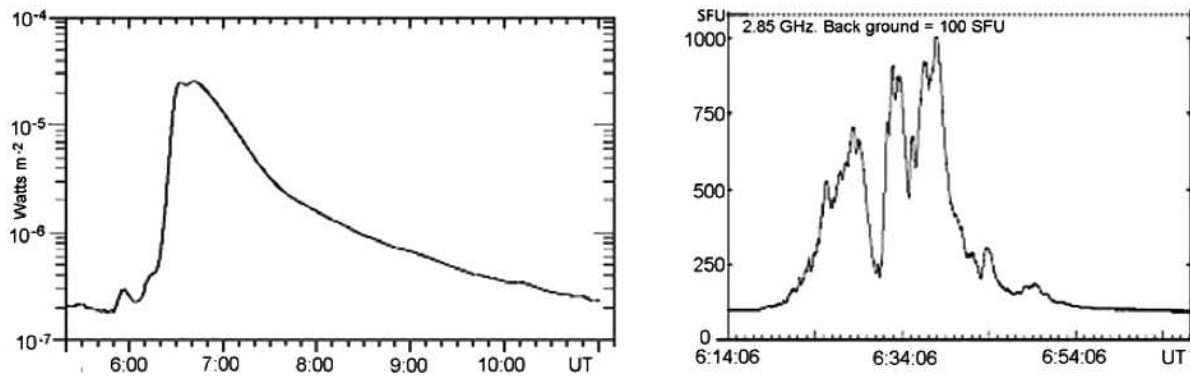


Рис. 1. Слева: изменение со временем SXR потока в полосе 1–8 Å 07.06.2011 (1-минутные данные GOES-15). Справа: изменение микроволнового радиоизлучения на частоте 2.85 ГГц во время вспышки (Кацивели, КрАО)

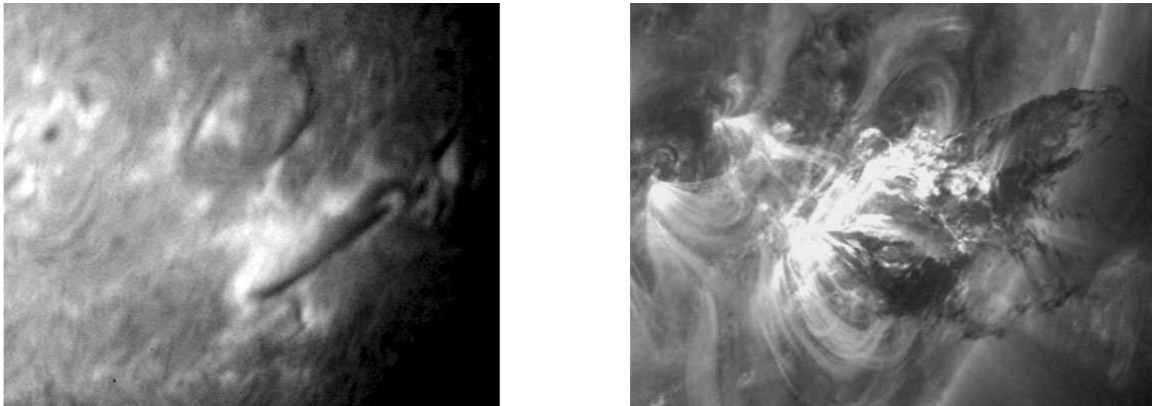


Рис. 2. Слева: H_{α} -изображение волокна в АО 11226 в 5:49:48 UT по наблюдениям на КГ-1. Справа: вспышка и эрупция волокна в 06:30 UT в полосе 171 Å по данным SDO/AIA

источником быстрого коронального выброса массы (скорость около 1250 км/с), а также послевспышечного усиления потока гамма-излучения. Впечатляющая картина эрупции волокна в этом событии наблюдалась на инструментах, установленных на борту SDO. По этим наблюдениям выполнен ряд работ, в которых исследовались разные аспекты этого эруптивного события (Innes et al., 2012; Williams et al., 2013; Gilbert et al., 2013; Solov'ev, 2012; Li et al., 2012; Inglis and Gilbert, 2013; Cheng et al., 2012; van Driel-Gesztelyi et al, 2014; Carlyle J. et al., 2014; Yardley et al., 2016; Fainshtein et al., 2017). H_{α} -изображение волокна (по наблюдениям на КГ-1), а также вспышки и эрупции волокна в полосе 171 Å (по данным SDO/AIA) представлены на рис. 2.

2.2 Динамика магнитных полей: морфология и эволюция

Активная область 11226 являлась западным компонентом активного комплекса, состоящего из трех близко расположенных групп пятен. Изображение АО в континууме, магнитограмма и фильтрограмма в полосе 304 Å приведены на рис. 3. Магнитная ситуация в активной области заметно изменялась за время прохождения ее по диску Солнца. По наблюдениям магнитных полей пятен в

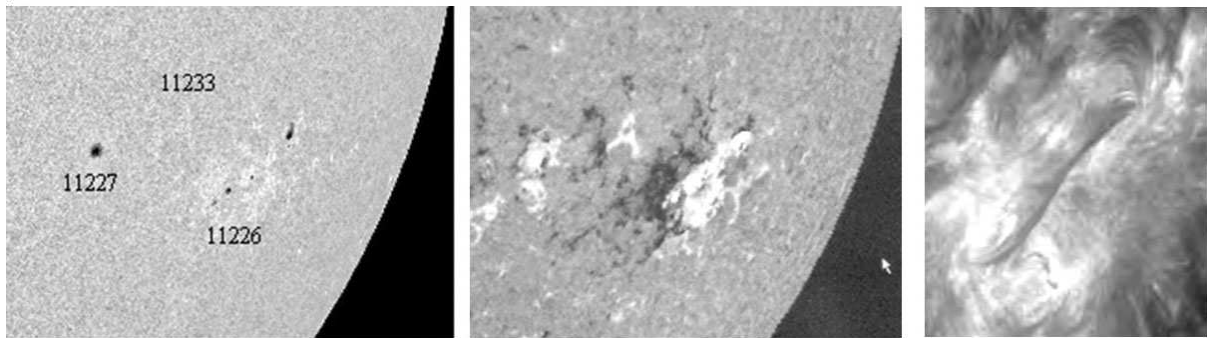


Рис. 3. Слева и по центру: изображение активного комплекса в континууме и магнитограмма продольного магнитного поля (SDO/HMI). Справа: изображение АО 11226 в полосе 304\AA HeII (SDO/AIA) 07.06.2011 в 04:00 UT

КрАО, в непосредственной близости от пятен преобладающей N-полярности возникали и исчезали поры как N-, так и S-полярности, иногда с образованием кратковременных дельта-конфигураций магнитного поля, что указывает на сложность выходящего магнитного потока. Эволюция магнитного поля в активном комплексе и ее влияние на эволюцию эруптивного процесса подробно исследованы в работе (Yardley et al., 2016). Динамика фотосферных магнитных полей во время вспышки по измерениям вектора магнитного поля на SDO/HMI приведена в работе (Fainshtein et al., 2017). С 5 июня АО находилась в стадии распада основных пятен, но выход нового магнитного потока обеих полярностей продолжался. По нашим наблюдениям, выход нового магнитного потока происходил и непосредственно во время вспышки, о чем свидетельствует появление ярких усов в области расположения вспышечных лент (Коваль, 1965; Bruzek, 1967).

2.3 Эволюция эруптивного процесса

Мы анализируем эволюцию эруптивного процесса по EUV-изображениям, полученным на SDO/AIA, и монохроматическим H_{α} -наблюдениям на телескопе КГ-1 в КрАО. На рис. 4 приведено H_{α} -изображение АО 7 июня за несколько минут до начала эрупции. Мощное волокно, расположенное примерно в NS направлении вдоль линии раздела полярности, укореняется концами вблизи пятен противоположной полярности. Первым указанием на нестабильность в АО было усиление медленного движения волокна в картинной плоскости в западном направлении (подъем), начавшееся примерно за два часа до вспышки. Средняя скорость движения центральной части волокна в картинной плоскости в период времени 04:30–06:15 UT увеличилась от 0.8 км/с до 1.9 км/с. В это же время происходило изменение морфологии волокна и появление новых поглощающих структур вблизи мест укоренения волокна в фотосферу. Медленное движение волокна сопровождалось появлением ярких тонкоструктурных нестационарных образований в области флоккулярной эмиссии вдоль волокна с востока и микровспышек вблизи мест укоренения волокна. Медленный подъем волокна перешел в стадию эрупции около 06:16–06:19 UT. Величина скорости движения центральной части волокна в 06:17:42 UT достигла 25 км/с, а в 06:21:30 UT – 120 км/с. В период перехода волокна в стадию эрупции начала формироваться яркая эмиссионная полоска, окаймляющая волокно, которая сформировалась к 06:19 UT. Эмиссионная полоска двигалась впереди волокна вместе с ним в западном направлении. Интересным явлением был эмиссионный динамический выброс из области укоренения северного конца волокна, лидирующий фронт которого распространялся в картинной плоскости в западном направлении с максимальной скоростью 575 км/с. Выброс был виден как в EUV, так и в H_{α} -излучении. Смена движения волокна от медленного к эруптивному совпадает с началом вспышки, которая началась с появления нескольких компактных образований на ме-

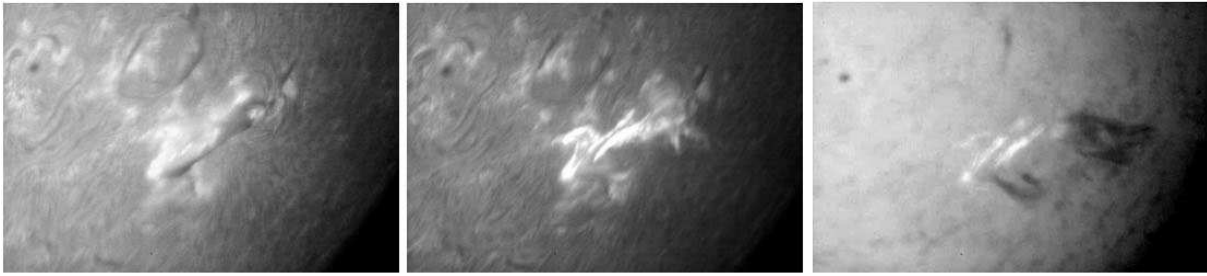


Рис. 4. Слева и по центру: изображение АО 11226 в центре линии H_{α} в 06:12:39 и 06:23:42 UT соответственно. Справа: изображение в синем крыле H_{α} в 06:26:14 UT (КГ-1)

сте будущей восточной ленты. На рис. 4 приведено изображение АО в центре линии H_{α} в начале импульсной фазы в 06:23:42 UT, на котором уже видны две вспыхивающие ленты. Восточная лента близко следует положению яркого флоккула к востоку от волокна, а западная – положению волокна в 06:12 UT.

2.4 Макроструктура волокна: H_{α} монохроматические наблюдения

На фильтрограмме в центре линии H_{α} в 06:23:42 UT (рис. 4) волокна уже не видно. На фильтрограмме в синем крыле линии H_{α} в 06:26:14 UT хорошо просматривается эруптивный процесс: видны извергающиеся темные структуры на концах волокна, как будто при подъеме волокна произошел разрыв его в средней части, а оба конца остались укорененными в фотосферу. На южном конце образовалась пеглеобразная структура. На северном конце происходит подъем нескольких, хорошо разрешаемых, различным образом ориентированных жгутовых структур. Жгутовые структуры пересекаются одна с другой, что указывает на разное изменение направления структур с высотой. Эти наблюдения показывают, что волокно состояло из нескольких индивидуальных скрученных жгутов, которые при начале эрупции раскручивались и поднимались под разными углами к поверхности Солнца. Тот факт, что наблюдалось два различных типа структур на концах волокна, говорит о том, что макроструктура волокна была различна на разных его участках. Раскручивание и разделение волокон при эрупции на отдельные структуры наблюдались и ранее (Martres et al., 1980; Raadu et al., 1987; Vršnak, 1990; Uddin et al., 2004; Panasenko et al., 2013; Su and van Ballegooijen, 2013).

2.5 Поле лучевых скоростей и внутренняя структура эруптивного волокна. Спектральные наблюдения

Спектральные наблюдения эруптивного события 7 июня 2011 г. получены в КрАО на 53-см коронографе конструкции Г.М. Никольского – А.А. Сазанова (КГ-2). Визуально спектр вспышки на КГ-2 увидели в 06:20 UT. В это время в H_{α} -вспышке уже формировалась двухленточная структура. В спектре также были видны крупные образования в поглощении с большими доплеровскими смещениями. Фотографические спектральные наблюдения были начаты в 06:26:30 UT. Регистрировался участок спектра 6550–6575 Å, дисперсия 0.578 Å/мм, экспозиция 0.15 с, промежуток между кадрами 3–5 с, размер изображения Солнца на щели спектрографа 180 мм. Качество изображений позволяло получить на лучших кадрах пространственное разрешение около 1 угловой секунды. Чтобы более полно изучить структуру поля лучевых скоростей во время эрупции, H_{α} -спектрограммы получались при разных положениях щели спектрографа в активной области. Одновременно со спектрами регистрировалось изображение Солнца на щели спектрографа через H_{α} -фильтр.

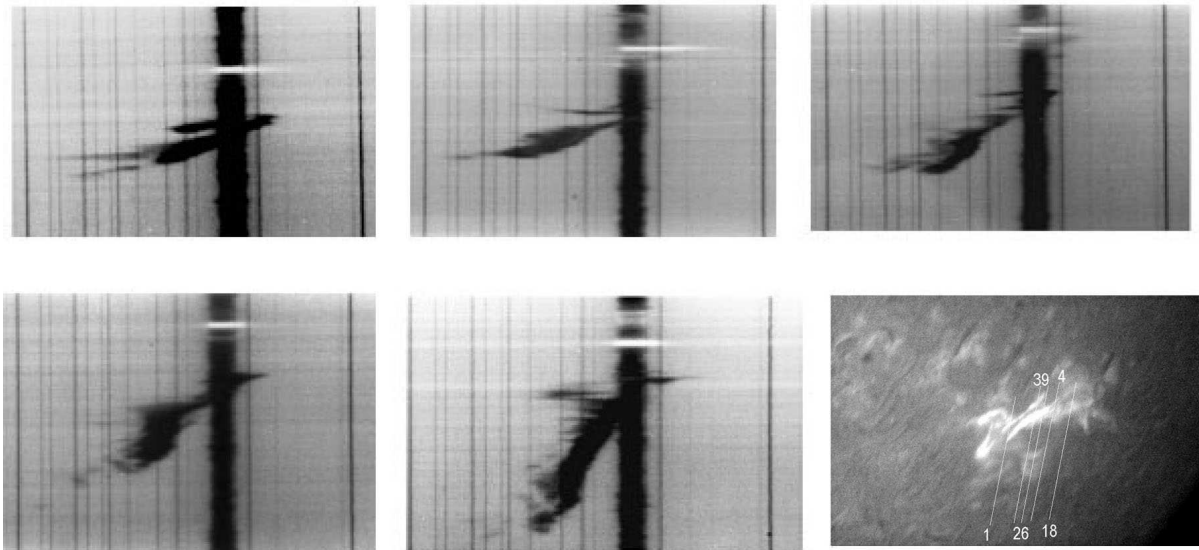


Рис. 5. Примеры H_{α} -спектров 1, 4, 18 (верхний ряд) и 26, 39 (нижний ряд), полученных в период 06:26:30–06:31:09 UT при различных положениях щели спектрографа в активной области, нанесенных на H_{α} -изображение АО в 06:23:42 UT (все позитив)

Мы исследуем H_{α} -спектры, полученные в период времени 06:26:30–06:34:30 UT, который соответствует первому и второму субвсплеску микроволнового радиоизлучения и подъему к максимуму мягкого рентгеновского излучения. Характерные примеры H_{α} -спектров, полученных при различных положениях щели спектрографа в разные моменты времени, и положение щели в активной области представлены на рис. 5. Извергающееся вещество волокна не видно на H_{α} -снимках Солнца на щели спектрографа вследствие выхода из полосы пропускания H_{α} -фильтра из-за больших доплеровских скоростей.

Как видно из рис. 5, в извергающемся волокне по виду спектра можно отметить несколько типов движений, наблюдавшихся в разных частях эрупции. Выбросы состоят из нескольких образований: основной очень плотной массы с меньшими доплеровскими смещениями и менее плотных выбросов с большими лучевыми скоростями, которые в большем или меньшем количестве присутствуют во всех выброшенных фрагментах волокна. Тело фрагмента очень структуризовано: внутри фрагмента наблюдаются структуры, имеющие разные интенсивности и доплеровские смещения. Фрагмент при движении сохраняет свою форму, которая, по-видимому, поддерживается вытянутой макроструктурой магнитного поля. На всех спектрах основное тело выброшенного фрагмента соединено тонким волокном с фотосферой. Доплеровский сдвиг фрагмента увеличивается вдоль щели с увеличением расстояния от места укоренения в фотосферу. Систематическое изменение доплеровского сдвига вдоль щели приводит к образованию наклонных к дисперсии структур, которые хорошо видны на спектрах, полученных при разных положениях щели. Так как наклонная структура смещена относительно несмещенной линии H_{α} , то наблюдаемую картину можно интерпретировать как свидетельство вращения плазмы фрагмента волокна вокруг его центральной оси при его движении в целом. Вращательные движения в протуберанцах и волокнах активно исследовались ранее (Rompolt, 1975; Ohman, 1969; Kurokawa et al., 1987; Plunkett et al., 2000), а также в недавних работах (Panasenکو et al., 2013; Su and van Ballegooijen, 2013).

Для нескольких фрагментов волокна и тонкоструктурных элементов был выполнен детальный фотометрический анализ спектров и построены контрастные профили линии H_{α} в эрупции. На рис. 6 приведены микрофотометрические записи вдоль дисперсии двух фрагментов волокна и

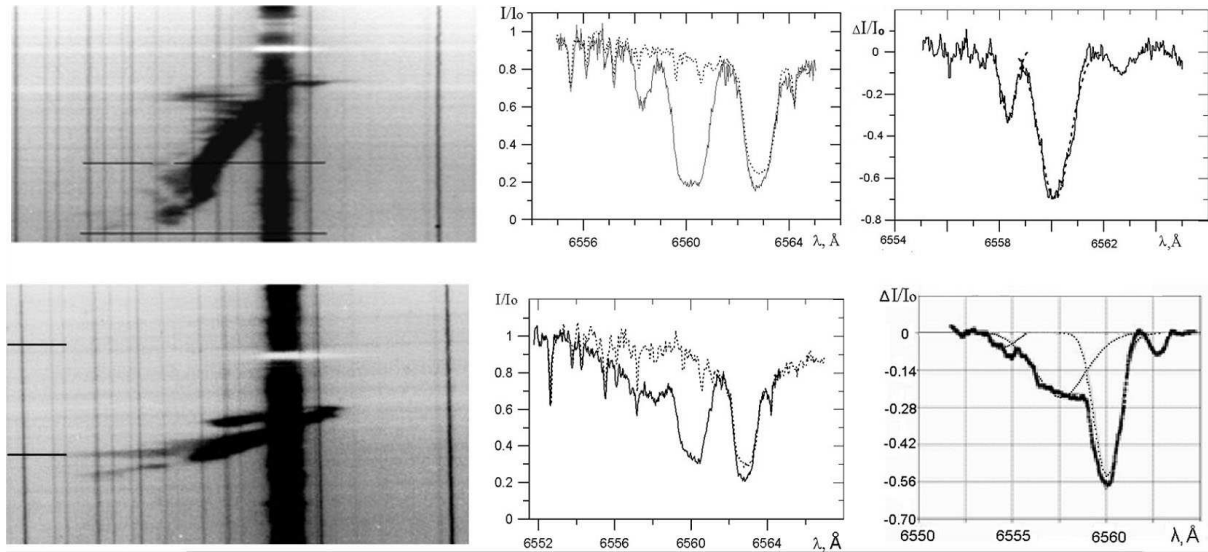


Рис. 6. Слева: спектрограммы эрупции. По центру: фотометрические записи фрагментов волокна (сплошная линия) и невозмущенной фотосферы (пунктир) в местах, отмеченных на спектрограммах. Справа: контрастные профили эрупции и их аппроксимации гауссианами, спектр 1 и спектр 39 (снизу вверх)

Таблица 1. Характеристики H_{α} -профилей двух фрагментов эруптивного волокна

Время, UT	№ спектра	Контраст $\Delta I/I_0$	Доплеровская полуширина, \AA	Доплеровский сдвиг, \AA
06:26:30	Сп. 1, р. 1	-0.53	0.660	-2.68
	р. 2	-0.25	1.466	-5.11
	р. 3	-0.05	0.494	-8.21
06:31:09	Сп. 39, р. 1	-0.77	0.560	-2.17
	р. 2	-0.34	0.275	-4.48

невозмущенного профиля линии H_{α} , а также контрастные профили. Профили абсорбции интерпретируются как поглощение солнечного излучения облаком поднявшегося волокна. Контрастные профили получены путем вычитания из остаточных интенсивностей контура линии H_{α} в эрупции остаточных интенсивностей контура соседней невозмущенной фотосферы для тех же длин волн. Из анализа H_{α} -профилей в эрупции были определены величины контраста, доплеровские полуширины и лучевые скорости поглощающих элементов. Фотометрические разрезы фрагментов вдоль дисперсии показывают, что в большинстве случаев контуры H_{α} сложные: в одном и том же месте фрагмента на щели спектрографа наблюдается несколько дискретных поглощающих структур, имеющих разный контраст, доплеровскую полуширину и лучевую скорость. В одних случаях (рис. 6, сп. 39) их контуры разделены вследствие большого различия в лучевых скоростях, и контуры элементов хорошо представляются гауссианами. В других случаях (рис. 6, сп. 1) происходит наложение контуров отдельных структур, и результирующий профиль H_{α} оказывается очень сложным. Например, контрастный профиль, приведенный на рис. 6, сп. 1, хорошо представляется наложением трех гауссиан с разными параметрами, соответствующих трем абсорбционным элементам. В таблице 1 в качестве примера приведены характеристики H_{α} -профилей в двух разных фрагментах эруптивного волокна: контраст, доплеровская ширина и доплеровский сдвиг.

Измерения показали, что лучевые скорости тонкоструктурных элементов заключены в пределах от 150 км/с до 400 км/с. Размеры элементов перпендикулярно направлению дисперсии – от 1.4 до 3 угловых секунд. Наблюдается большой разброс доплеровских полуширин и доплеровских смещений в зависимости от положения щели и фазы эрупции. Следует отметить очень большую величину контраста в крупных фрагментах волокна.

Для наклонных структур в спектре фрагментов измеренная по доплеровскому смещению скорость V_d может быть представлена как сумма скорости вращения V_r и скорости движения фрагмента в целом V_f . Применяв метод, изложенный в работе (Plunkett et al., 2000), были определены скорости вращения фрагментов и скорости их движения в целом. Полученные значения для нескольких фрагментов приведены в таблице 2. Отрицательные скорости соответствуют доплеровскому смещению в синюю область спектра (подъем или движение в сторону наблюдателя).

Таблица 2. Скорости вращения фрагментов волокна V_r и движения в целом V_f

№ спектра	Время, UT	V_f , км/с	V_r , км/с
1	06:26:30	-40	126
4	06:27:05	-150	108
18	06:29:10	-154	75
39	06:31:09	-114	78

3 Результаты и обсуждение

На основании анализа H_α монохроматических и спектральных наблюдений, а также данных SDO изучена ранняя стадия эволюции эруптивного вспышечного события 7 июня 2011 г., исследована тонкая структура эруптивного волокна и внутренних движений вдоль луча зрения, а также проанализированы профили линии H_α в эруптивном волокне во время импульсной фазы вспышки. Результаты анализа показали:

1. Эруптивное событие произошло в активной области, находящейся на стадии распада основных пятен, но в которой происходил выход нового магнитного потока. Перестройка магнитного поля, а именно изменение структуры пятен и движение образовавшихся фрагментов тени, исчезновение магнитного потока, а также выход нового магнитного потока в непосредственной близости от волокна могли послужить причиной эрупции, что подтверждает полученные ранее результаты (см. Webb et al., 1994; Yardley et al., 2016). Выход нового магнитного потока наблюдался и непосредственно во время вспышки.
2. Эволюция эруптивного события 7 июня 2011 г. согласуется с двухфазовой картиной эволюции ранее изученных эруптивных волокон, а именно существование медленной и быстрой фазы подъема (Moore and Roumeliotis, 1991; Sterling and Moore, 2005; Fainshtein et al., 2017). Усиление медленного движения волокна сопровождалось изменением его структуры и появлением кратковременной тонкоструктурной эмиссии вдоль волокна и вблизи мест его укоренения в фотосферу. Кратковременные поярчания в разных участках длин волн электромагнитного излучения от радио до SXR перед началом вспышек отмечались и ранее (Schmahl et al., 1989; Chifor et al., 2007).
3. Вспышка началась практически одновременно с переходом волокна в стадию эрупции и с извержением яркого вещества с большими скоростями в картинной плоскости в EUV длинах волн.
4. Наблюдения с H_α -фильтром в начале эрупции показали, что волокно состояло из нескольких скрученных жгутов, которые при начале эрупции раскручивались и поднимались под разными

углами к поверхности Солнца. Скрученность макроструктур была различной в разных участках волокна.

5. Спектральные наблюдения показали, что поле лучевых скоростей в волокне очень сложное и тонкоструктурное. Эрупции состоят из выброса очень плотных (контраст до -0.80) крупных фрагментов волокна с большим количеством тонкоструктурных элементов внутри фрагмента и потока индивидуальных сгустков с различными плотностями и лучевыми скоростями, которые оторваны от фрагмента. Лучевые скорости сгустков заключены в пределах от -150 км/с до -400 км/с.
6. Движение больших фрагментов волокна можно представить комбинацией вращательного движения фрагмента вокруг центральной оси волокна и движения в целом по направлению к наблюдателю. Измеренные скорости вращения фрагментов заключены в пределах от 75 км/с до 130 км/с, а скорости движения в целом от -40 км/с до -150 км/с.
7. Фрагмент при движении сохраняет свою форму со временем, которая, по-видимому, поддерживается вытянутыми силовыми линиями магнитного поля, которые остаются связанными с фотосферой в начальный период эрупции.
8. Характерной особенностью эрупции является сильная неоднородность плазмы во всех выброшенных фрагментах. Поглощение сконцентрировано в дискретных образованиях размером $1.4-3$ угловые секунды. H_{α} -профили отдельных структур хорошо представляются гауссианами, имеющими разные интенсивности, доплеровские ширины и доплеровские сдвиги, что указывает на различие физических условий, в которых сгустки ускорялись при эрупции. Более подробное исследование структуры выбросов и определение в них физических параметров будут предметом дальнейшей работы.

4 Выводы

Если рассматривать наши результаты с точки зрения основных моделей эрупции, предложенных ранее в ряде работ (см. обсуждение в (Chifor et al., 2007)), то результаты наших наблюдений наиболее соответствуют особенностям, предсказанным internal tether-cutting механизмом эрупции. Истинную картину движений и физических условий в эруптивных волокнах можно получить только при спектральных наблюдениях, качество которых дает возможность разрешить тонкую структуру порядка 1 угловой сек. Поле лучевых скоростей, а следовательно и магнитное поле, очень тонкоструктурное и сложное, и это должно учитываться при построении моделей эрупции. Так как активизация волокна начинается за некоторое время до начала вспышки, то этот факт можно использовать для краткосрочного прогноза появления эруптивных вспышек.

Авторы благодарны наблюдателям коронографа КГ-1 Шаховской А.Н. и Стрельник Т.М. за предоставленные H_{α} монохроматические наблюдения эруптивного события, а также научным группам SDO/AIA и SDO/HMI за возможность работы с данными. Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 16-02-00221А и Программы президиума РАН № 28.

Литература

- Коваль А.Н., 1965. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 33. С. 138. [Koval' A.N., 1965. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 33, p. 138. (In Russ.)]
- Bruzek A., 1967. Solar Phys., vol. 2, p. 451.
- Carlyle J., Williams D.R., van Driel-Gesztelyi L., et al., 2014. Astrophys. J., vol. 788, p. 25.
- Cheng X., Zhang J., Olmedo O., et al., 2012. Astrophys. J., vol. 745, p. L5.
- Chifor C., Tripathi D., Mason H.E., and Dennis B.R., 2007. Astron. Astrophys., vol. 472, p. 967.
- De Jager C. and Svestka Z., 1985. Solar Phys., vol. 100, p. 435.
- Fainshtein V.G., Egorov Y.I., and Rudenko G.V., 2017. Geomagnetism and Aeronomy, vol. 57, no. 7, p. 906.
- Gilbert H.R., Inglis A.R., Mays M.L., et al., 2013. Astrophys. J. Lett., vol. 776, p. L12.

- Inglis A.R. and Gilbert H.R., 2013. *Astrophys. J.*, vol. 777, p. 30.
- Innes D.E., Cameron, R.H., Fletcher L., et al., 2012. *Astron. Astrophys.*, vol. 540, p. L10.
- Kahler S.W., Moore R.L., Kane S.R. and Zirin H., 1988. *Astrophys. J.*, vol. 328, pp. 824–829.
- Khan J.I., Uchida Y., McAllister A.H., et al., 1998. *Astron. Astrophys.*, vol. 336, p. 753.
- Kubota J., Kitai R., Tohmura I., and Uesugi A., 1992. *Solar Phys.*, vol. 139, p. 65.
- Kurokawa H., Hanaoka Y., Shibata K., and Uchida Y., 1987. *Solar Phys.*, vol. 108, p. 257.
- Lemen J.R., Title R., Akin D.J., et al., 2012. *Solar Phys.*, vol. 275, p. 17.
- Li T., Zhang Y., Yang S., and Liu V., 2012. *Astrophys. J.*, vol. 746, p. L103.
- Martin S.F., 1989. *Solar Phys.*, vol. 121, no. 1/2, p. 215.
- Martin S.F. and Ramsey H.E., 1972. in McIntosh P.S. and Dryer M. (Eds), *Solar Activity Observation and Prediction*, p. 371.
- Martres M., Mouradian Z., and Soru-Escaunt I., 1980. in Moriyama F. and Henoux J.C. (Eds), *Proceedings of the Japan-France Seminar on Solar Physics*, p. 188.
- McAllister A.H., Kurokawa H., Shibata K., Nitta N., 1996. *Solar Phys.*, vol. 169, p. 123.
- McAllister A.H., Uchida Y., Tsuneta S., Strong K.T., 1992. *Publ. Astron. Soc. Japan*, vol. 44, p. L205.
- Moore R.L. and Roumeliotis G., 1991. in Svestka Z., et al. (Eds), *Proceedings of Colloquium No. 133 of IAU, Eruptive Solar Flares*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, vol. 399, p. 69.
- Morimoto T. and Kurokawa H., 2003. *Publ. Astron. Soc. Japan*, vol. 55, p. 518.
- Ohman Y., 1969. *Solar Phys.*, vol. 9, p. 427.
- Pallavichini R., Serio S., and Vaiana G.S., 1977. *Astrophys. J.*, vol. 216, p. 108.
- Panasenko O., Martin S.F., Velli M., and Vourlidis A., 2013. *Solar Phys.*, vol. 287, p. 391.
- Plunkett S.P., Vourlidis A., Simberova S., et al., 2000. *Solar Phys.*, vol. 194, p. 371.
- Raadu V.A., Malherbe J.M., Schmieder B. and Mein N., 1987. *Solar Phys.*, vol. 109, p. 59.
- Rompolt B., 1975. *Solar Phys.*, vol. 41, p. 329.
- Rust D.M., 1976. *Solar Phys.*, vol. 47, p. 21.
- Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I., et al., 2012. *Solar Phys.*, vol. 275, p. 229.
- Schmahl E.J., Webb D.F., Woodgate B., et al., 1989. In Kundu M.R. et al. (Eds), *Energetic Phenomena on the Sun*, p.77.
- Solov'ev A.A., 2012. *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 52, no. 8, p. 1062.
- Sterling A.C. and Moore R.L., 2005. *Astrophys. J.*, vol. 630, p. 1148.
- Su Y. and van Ballegooijen A., 2013. *Astrophys. J.*, vol. 764, p. 91.
- Svestka Z. and Cliver E.W., 1992. In Svestka Z., et al. (Eds), *Proceedings of Colloquium No. 133 of IAU, Eruptive Solar Flares*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, vol. 339, p. 1.
- Uddin W., Jain R., Yoshimura K., et al., 2004. *Solar Phys.*, vol. 225, p. 325.
- van Driel-Gesztelyi L., Baker D., Torok T., et al., 2014. *Astrophys. J.*, vol. 788, p. 85.
- Vršnak B., 1990. *Solar Phys.*, vol. 127, p. 129.
- Webb D.F., Forbes T.G., Auras H., et al., 1994. *Solar Phys.*, vol. 153, p. 73.
- Webb D.F., Krieger A.S. and Rust D.M., 1976. *Solar Phys.*, vol. 48, p. 159.
- Williams D.R., Daker D. and van Driel-Gesztelyi L., 2013. *Astrophys. J.*, vol. 764, p. 165.
- Yardley S.L., Green L.M., Williams D.R., et al., 2016. *Astrophys. J.*, vol. 827, p. 151.