

НИЗКИЕ ЗНАЧЕНИЯ КРИТИЧЕСКОГО ИНДЕКСА УБЫВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЭРУПЦИЯХ ПРОТУБЕРАНЦЕВ

© 2022 г. Б. П. Филиппов*

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия*

*e-mail: bfilip@izmiran.ru

Поступила в редакцию 25.03.2021 г.

После доработки 26.04.2021 г.

Принята к публикации 24.09.2021 г.

Предпринята попытка с максимально возможной точностью оценить критическое значение индекса убывания коронального магнитного поля n_c при эрупциях волокон/протуберанцев. Рассмотрен ряд событий в тот период, когда космические аппараты STEREO (Solar Terrestrial Relations Observatory) находились на угловом удалении около 90° от линии Солнце–Земля (2010–2011 гг.). Из девяти эрупций волокон, происходивших вблизи центрального меридиана Солнца, для земного наблюдателя в двух случаях индекс равен единице, а в остальных – меньше, с минимальным значением $n_c = 0.2$. Такие низкие значения почти не приводятся в литературе. Вместе с тем, они характерны для развития неустойчивости магнитного жгута с закрепленными концами.

DOI: 10.31857/S0016794022010072

1. ВВЕДЕНИЕ

Эрупции (т.е. внезапный быстрый подъем) протуберанцев/волокон на Солнце обычно инициируют цепь явлений, заканчивающихся возмущениями космической погоды и геомагнитными бурями. Внезапное начало движения вверх ранее малоподвижного образования, как правило, наблюдается раньше других драматических проявлений спорадической солнечной активности: вспышек, корональных выбросов вещества [Zirin and Lackner, 1969; Dodson and Hedeman, 1970; Мартин и Рамзей, 1976; Sterling and Moore, 2005; Cheng et al., 2015; Grechnev et al., 2015; Kleint et al., 2015; Holman and Foord, 2015; Koleva et al., 2018]. Поэтому понимание причин начала эрупций является важной задачей не только в познавательном плане, но и в практическом смысле. Достаточной ясности в этом вопросе пока нет.

Наиболее вероятной причиной внезапных эрупций протуберанцев считается катастрофическая потеря равновесия магнитного жгута с продольным электрическим током в магнитном поле, создаваемым в короне подфотосферными источниками (токами) [Филиппов, 2007]. Спиральные силовые линии жгута образуют каркас, в котором накапливается плотное тяжелое вещество протуберанца. Этот каркас поддерживается высоко в короне диамагнетизмом фотосферы, эквивалентным действием зеркально отраженного в фотосфере коронального тока противоположной на-

правленности. Устойчивость равновесия жгута определяется вертикальным градиентом коронального магнитного поля, который принято описывать с помощью так называемого индекса убывания поля [Bateman, 1978; Филиппов и Ден, 2000; Filippov and Den, 2001; Kliem and Török, 2006]

$$n = -\frac{\partial \ln B_t}{\partial \ln h}, \quad (1)$$

где B_t – горизонтальная составляющая поля, перпендикулярная оси жгута.

Если жгут достаточно длинный и тонкий, его можно приближено считать прямым линейным электрическим током, и в этом случае критическое значение индекса убывания $n_c = 1$ [van Tend and Kuperus, 1978; Молоденский и Филиппов, 1987]. Изогнутый жгут испытывает действие дополнительной электромагнитной силы, направленной от центра кривизны. В случае, если ось жгута имеет форму окружности, неустойчивость наступает при значении $n_c = 1.5$, и в силу геометрии ее называют “тороидальной неустойчивостью” [Осовец, 1958; Bateman, 1978; Kliem and Török, 2006]. Для жгута с существенным поперечным сечением как с прямой осью, так и в виде окружности, критический показатель лежит в интервале 1.1–1.3, если сечение при эрупции увеличивается, и в интервале 1.2–1.5, если сечение постоянно [Demoulin and Aulanier, 2010]. Если концы изо-

гнутого жгута закреплены в плотной фотосфере (“вморожены” в плазму фотосферы), теоретическое значение критического индекса убывания может не только превышать единицу, но и быть меньше ее [Olmedo and Zhang, 2010; Green et al., 2018; Filippov, 2021]. Однако возможность начала эрупции при значении индекса убывания меньше единицы редко принимается во внимание. Большинство исследователей старается связать “тороидальную неустойчивость” со значениями индекса $n_c \approx 1.5$.

В настоящее время не существует методов надежного и точного измерения магнитного поля в солнечной короне. Значения индекса убывания поля в эруптивных явлениях оценивают обычно с помощью экстраполяции измерений в фотосфере в потенциальном или бессиловом приближении. Сравнение значений индекса на вершинах спокойных и эруптивных протуберанцев [Филиппов и Ден, 2000; Filippov and Den, 2001; Filippov and Zagnetko, 2008] показало, что спокойные протуберанцы находятся в области $n < 1$, тогда как эруптивные протуберанцы располагаются при $n \approx 1$. “Давление” теоретических представлений о развитии тороидальной неустойчивости при $n \geq 1.5$ побуждает многих авторов демонстрировать примеры событий с близкими к этому порогу значениями индекса. Например, Zuccarello et al. [2014a] первоначально сообщили о близости величины индекса на высоте начала эрупции протуберанца 4 августа 2011 г. к ожидаемому порогу ($n_c \approx 1.3–1.5$), но последующее более внимательное изучение этого события показало, что значения лежат скорее в интервале $n_c \approx 0.8–1.1$ [Zuccarello et al., 2014b]. В исследовании более сотни эрупций протуберанцев на лимбе в период с 2010 г. по 2014 г. критическое значение индекса оказалось в широком интервале 0.7–2 со средним значением $n_c \approx 1.1$ [McCauley et al., 2015]. В другой выборке за 2012–2013 гг. было получено среднее значение индекса $n_c \approx 0.84$ с разбросом от 0 до 2 [Aggarwal et al., 2018]. Среди 16 эрупций вблизи максимума 24-го солнечного цикла, изученных в работе [Filippov, 2020], более половины начались на высоте, где индекс убывания поля был меньше единицы.

Точность определения критического значения индекса убывания в большинстве работ не очень велика из-за трудностей одновременного измерения высоты, на которой начинается эрупция волокна, и магнитного поля в фотосфере. Кинематика эрупции лучше всего видна при расположении волокна вблизи лимба или на лимбе в виде протуберанца. В этом случае измерения магнитного поля в фотосфере под ним малонадежны или вообще недоступны из-за малого угла луча зрения к поверхности фотосферы. Приходится пользоваться данными о поле, полученными за несколько дней до или после события, предполагая несущественные изменения крупномасштабного поля за этот интервал. Напротив, при эрупции вблизи центра диска Солнца трудно достаточно точно определить высоту начала подъема волокна. Поэтому приводимые малые критические значения индекса можно было бы отнести на счет неточностей и разброса полученной величины.

Чтобы убедиться, что эрупции могут начинаться при значениях индекса, меньших единицы, мы рассмотрели ряд событий в тот период, когда космические обсерватории STEREO (Solar Terrestrial Relations Observatory) находились на угловом удалении $\sim 90^\circ$ от линии Солнце–Земля. При этом выбирались события, происходившие вблизи центрального меридиана Солнца для земного наблюдателя, так что можно было использовать магнитограммы именно в момент эрупции. STEREO наблюдали эти события как эрупции протуберанцев над лимбом в их системе координат, и таким образом высота, с которой начинается быстрый подъем протуберанцев, легко могла быть измерена.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Положение волокон на диске Солнца перед эрупцией определялось с помощью изображений, получаемых комплексом ультрафиолетовых телескопов AIA (Atmospheric Imaging Assembly [Lemen et al., 2012]) на борту космической обсерватории SDO (Solar Dynamic Observatory), а также H α -фильтрограмм наземных обсерваторий, входящих в глобальную систему GONG (Global Oscillation Network Group), которая была создана Национальной солнечной обсерваторией США (National Solar Observatory). В основном выбирались события, приведенные в Каталоге эрупций волокон, зафиксированных AIA (Filament Eruption Catalog, <http://aia.cfa.harvard.edu/filament/>) [McCauley et al., 2015]. В этот каталог включены эрупции, наблюдавшиеся в период с июня 2010 г. по сентябрь 2014 г., но по условию нахождения аппаратов STEREO на угловом удалении $\sim 90^\circ$ от линии Солнце–Земля, для наших целей пригодны были только события 2010–2011 гг.

На борту двух аппаратов STEREO (Ahead and Behind: STEREO A и STEREO B) установлены одинаковые оптические наблюдательные комплексы SECCHI (Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation), включающие ультрафиолетовые телескопы EUVI (Extreme Ultraviolet Imager) [Howard et al., 2008]. Частота съемки диска Солнца и окружающей короны до $1.7 R_\odot$ не слишком высока (1 кадр в 12 мин), но вполне достаточна, чтобы определить высоту, с которой эруптивный протуберанец начинает интенсивно ускоряться.

Магнитное поле в короне на высоте протуберанцев рассчитывалось в потенциальном приближении по данным измерения продольной (вдоль луча зрения) компоненты магнитного поля в фотосфере инструментами MDI (Michelson Doppler Imager) [Scherrer et al., 1995] на борту космической обс. SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) и HMI (Heliospheric and Magnetic Imager) [Schou et al., 2012] на борту SDO. Поскольку нас интересует магнитное поле на высотах, малых по сравнению с радиусом Солнца, то можно пренебречь сферичностью и воспользоваться известным решением внешней краевой задачи Неймана с плоской границей (см., например, [Тихонов и Самарский, 1972]), причем для граничного условия мы вырезаем из магнитограммы полного диска прямоугольную площадку, включающую основные элементы концентрации поля в окрестностях волокна. Подробности методики расчетов описаны в работах [Филиппов и Ден, 2000; Filipov and Den, 2001; Filipov, 2013].

Индекс убывания поля рассчитывался в виде двумерного распределения (карты) избранной области, окружающей волокно, на высоте, соответствующей началу эрупции волокна. Эта высота определялась по изображениям, полученным аппаратами STEREO, на которых данное волокно наблюдалось в виде протуберанца над лимбом Солнца, как наибольшая высота хребта протуберанца. Как правило, наибольшей высотой обладает средняя часть волокна, так как хребет перед началом эрупции имеет обычно вид плавной дуги с концами, связанными с хромосферой. Полученная карта накладывалась, с учетом эффекта проекции, на изображение солнечного диска с волокном, и в качестве критического значения индекса брались величины вблизи средней и соответственно самой высокой части волокна. Для других участков волокна, высота которых ниже центрального, значения индекса будут меньше, поскольку индекс обычно растет с высотой.

3. ПРИМЕРЫ ЭРУПЦИЙ С НИЗКИМ ЗНАЧЕНИЕМ ИНДЕКСА УБЫВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

3.1. Эрупция 13 ноября 2010 г.

Спокойное волокно эруптировало (т.е. внезапно начало быстро подниматься) вблизи центрального меридиана в северном полушарии после 04:00 UT 13 ноября 2010 г. Высота протуберанца над фотосферой на снимках STEREO A и B составляла 66 Мм и 64 Мм (рис. 1а, 1б) за несколько минут до начала эрупции в 04:00 UT. Аппараты STEREO A и B находились на угловом удалении от Земли в 84.5° and 83° соответственно. Верхняя граница протуберанца (хребет) — изогнутая, и луч зрения каждого аппарата касается его в

разных точках в соответствии с проекцией протуберанца на картинную плоскость в каждой системе координат. Поэтому мы выбираем большее значение высоты (66 Мм) в качестве критической высоты начала эрупции. На рисунке 1в показан участок магнитограммы SDO/HMI, полученной в 04:00 UT, который охватывает область с границами, удаленными примерно на ± 300 угловых секунд от центра волокна. На рисунке 1г показана та же область на изображении, полученном в канале 304 Å телескопа SDO/AIA, на которую наложены изолинии индекса убывания магнитного поля на высоте 66 Мм в интервале значений от 0.5 до 1.5 (тонкие линии с цифровыми значениями). Нанесено также положение линий раздела полярностей на той же высоте в виде толстых сплошных линий, и штриховой линией показана ось волокна. Характерная величина индекса на высоте начала эрупции ~ 0.75 .

3.2. Эрупция 16 декабря 2010 г.

Эрупция спокойного волокна 16 декабря 2010 г. началась после 06:00 UT так же вблизи центрального меридиана в северном полушарии. Волокно было не очень плотным, но различимым на H α -фильтрограммах Удайпурской солнечной обсерватории. Аппараты STEREO A и B удалились к этому времени от Земли на 88° and 85° соответственно. Протуберанец на их снимках демонстрировал довольно большую исходную высоту над фотосферой ~ 90 Мм (рис. 2а, 2б). В окрестностях волокна, показанного штриховой линией на рис. 2г, значения индекса убывания всюду меньше единицы, кроме восточного конца изогнутой оси волокна. В области средней части и соответственно вершины волокна индекс равен ~ 0.7 .

3.3. Эрупция 9 июня 2011 г.

На рисунке 3 приведены данные об эрупции 9 июня 2011 г., начавшейся в 13:45 UT. Как и в предыдущих примерах, исходное волокно располагалось вблизи центрального меридиана в северном полушарии. Удаление аппаратов STEREO A и B от Земли составляло соответственно 93° и 95°. Вершина арки волокна была чуть западнее центрального меридиана, поэтому высота протуберанца над лимбом больше на снимках STEREO A — 47 Мм, против 32 Мм для STEREO B (рис. 3а, 3б). Бóльшее значение, 47 Мм, мы принимаем за критическую высоту эрупции. Волокно расположено в области довольно слабых полей, точность измерений которых не слишком велика. Возможно поэтому, волокно не очень точно следует линии раздела полярностей (рис. 3г). Отсутствие концентрированных источников поля вблизи волокна обуславливает малый вертикальный градиент

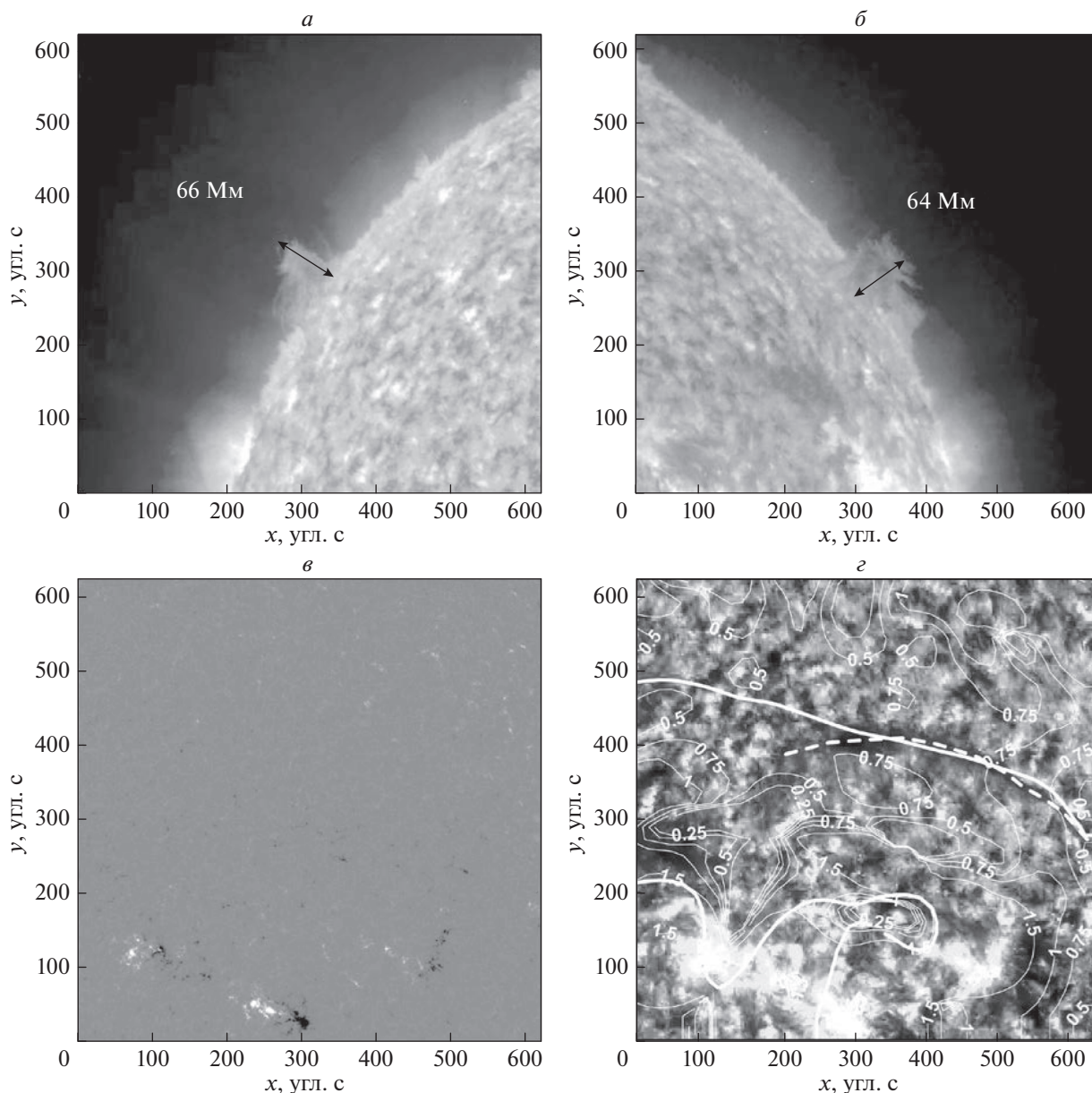


Рис. 1. Солнечный протуберанец 13 ноября 2010 г. в 04:00 UT в поле зрения космических обсерваторий STEREO A (*a*) и STEREO B (*б*) в канале 304 \AA телескопов EUVI; (*в*) – фрагмент магнитограммы SDO/HMI в окрестностях волокна в то же самое время (белые участки – положительная полярность, темные – отрицательная); (*г*) – тот же самый участок солнечной поверхности, что и на панели (*в*), наблюдаемый в канале 304 \AA телескопа SDO/AIA с наложенными изолиниями индекса убывания магнитного поля на высоте 66 Мм в интервале значений от 0.5 до 1.5 (тонкие линии с цифровыми значениями), линиями раздела полярностей на той же высоте (толстые сплошные линии) и осью волокна, показанной штриховой линией. (С разрешения консорциумов STEREO/SECCHI, SDO/AIA и SDO/HMI).

поля, так что индекс убывания на высоте 47 Мм составляет всего ~ 0.5 .

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице 1 приведены параметры эрупций волокон вблизи центрального меридиана как тех, что были рассмотрены в предыдущем разделе, так и ряда других, наблюдававшихся в благоприятный

период нахождения STEREO. Указаны даты событий, координаты центральных участков волокон перед эрупцией, время начала эрупций, длина волокон между основаниями, остающимися зафиксированными в фотосфере во время эрупций L , высота начала эрупций (критическая высота) h_c и значения индекса убывания магнитного поля на этой высоте около волокон n_c . Критическая высота меняется для рассмотренных собы-

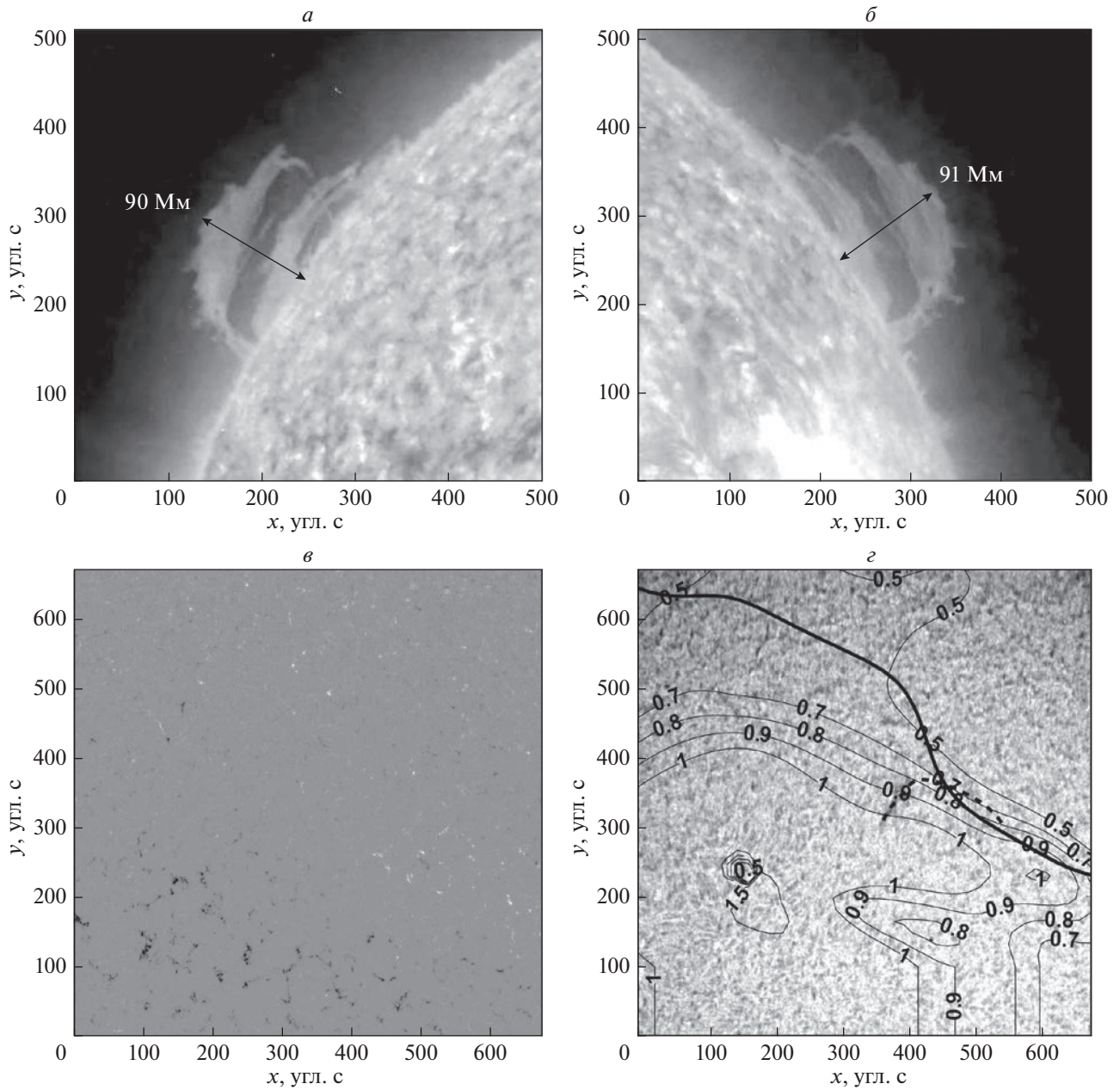


Рис. 2. То же, что на рис. 1 для эрупции 16 декабря 2010 г. в 06:00 UT и высоты 90 Мм, за исключением панели (г), где использована H α -фильтрограмма Удайпурской солнечной обсерватории. (С разрешения консорциумов STEREO/SECCHI, SDO/HMI и Удайпурской солнечной обсерватории).

тий от 20 Мм до 120 Мм. Наибольшая критическая высота, как можно было ожидать, наблюдается у самых протяженных волокон, хотя самое короткое эруптивное волокно 16 декабря 2010 г. тоже имеет критическую высоту в 90 Мм. У этих протяженных волокон – также самое большое значение критического индекса убывания – около единицы. Самое низкое значение индекса ($n_c = 0.2$) – у эруптивного волокна 21 июня 2011 г. Следует отметить, что, несмотря на все наши старания как можно точнее определить значения

критических параметров, возможные ошибки и неточности составляют, по крайней мере, 10–20%.

Любопытно сравнить полученные результаты с теоретическими оценками индекса убывания. На рисунке 4 измеренные значения нанесены в виде символов, демонстрирующих зависимость критического значения индекса убывания магнитного поля от критической высоты h_c , нормированной на половинное расстояние между основаниями эруптивного волокна $L/2$. Теоретическая

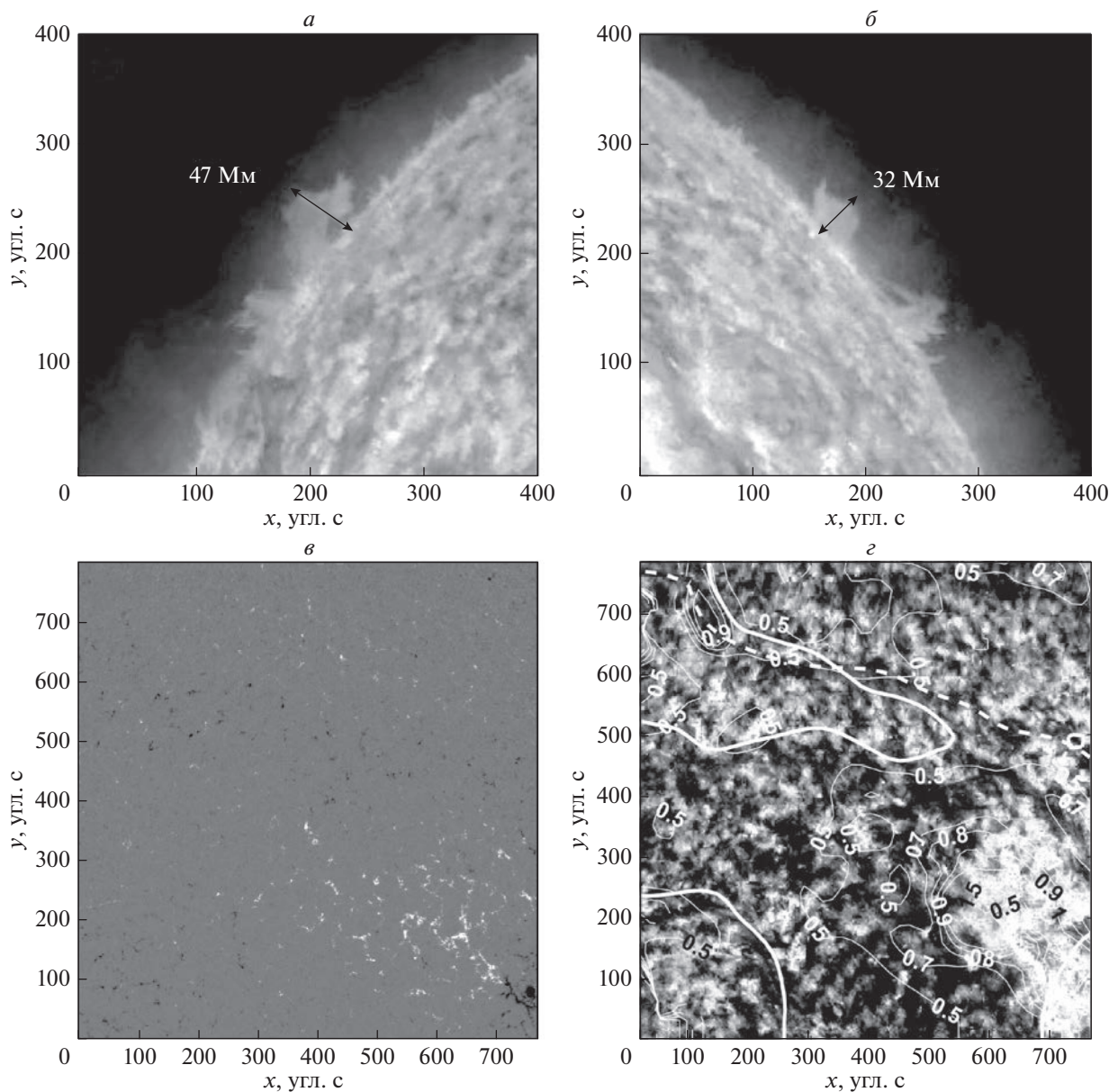


Рис. 3. То же, что на рис. 1 для эрупции 9 июня 2011 г. в 13:46 UT и высоты 47 Мм. (С разрешения консорциумов STEREO/SECCHI, SDO/AIA и SDO/HMI).

зависимость, следующая из модели эрупции магнитного жгута с закрепленными на поверхности концами, сохраняющего форму продольной оси в виде сегмента окружности [Filippov, 2021], показана сплошной кривой. Конечно, экспериментальные точки не ложатся точно на кривую, но находятся от нее достаточно близко и демонстрируют похожее поведение. Кривая взята непосредственно из работы [Filippov, 2021], и она отражает общее поведение индекса при изменении формы оси жгута. Для малой относительной высоты жгута, форма оси приближается к прямой линии, и

значение критического индекса близко к единице. Минимум критического индекса (возможны даже отрицательные значения) достигается при форме, близкой к полукругности. При больших значениях высоты вершины жгута форма стремится к полной окружности, а критический индекс – к 1.5 (эта часть кривой не показана на рис. 4, так как таких случаев в нашей выборке нет). Надо сказать, что модель имеет некоторые свободные параметры (например, толщина жгута), и можно было бы достигнуть лучшего соответствия, но это не было целью данной работы.

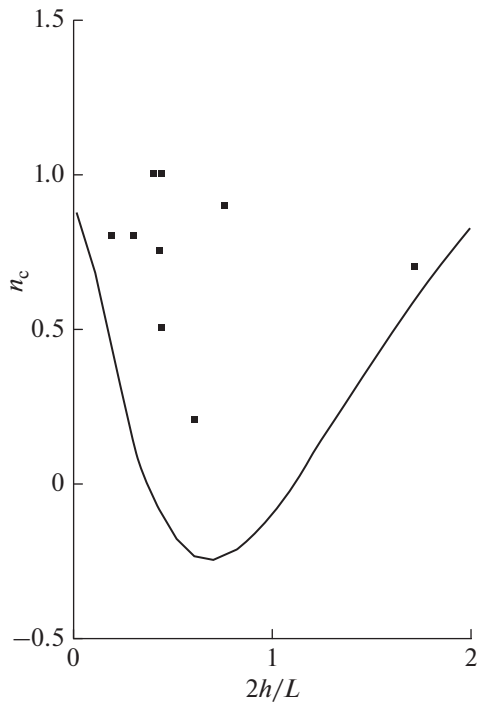


Рис. 4. Зависимость критического значения индекса убывания магнитного поля от критической высоты, нормированной на половинное расстояние между основаниями эруптивного волокна (символы). Сплошная кривая показывает теоретическую зависимость в модели [Filippov, 2021].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В литературе, посвященной исследованиям солнечных эрупций, довольно прочно утвердилось понятие “тороидальной неустойчивости”, характерной для равновесия кольцевого электрического тока во внешнем магнитном поле, убывающем с увеличением расстояния от центра кольца R как R^{-n} . Неустойчивость возникает при показателе $n_c = 1.5$. Хотя представление протуберанца в начале эрупции в виде кольца очень

схематично, многие исследователи пытаются связать инициацию эрупции со значением индекса $n = 1.5$. Вместе с тем, наблюдения свидетельствуют, что часто эрупции волокон/протуберанцев начинаются на высоте с показателем убывания поля около единицы и существенно ниже.

Мы постарались как можно точнее определить критическое значение индекса для событий, наблюдавшихся в период, когда космические обсерватории STEREO давали возможность видеть Солнце сбоку. Таким способом повышалась точность данных о магнитном поле в фотосфере для событий, происходящих вблизи центрального меридиана для Земли, и измерений высоты протуберанца, наблюдаемого сбоку. Из девяти подходящих по указанным критериям событий ни в одном не обнаружилось критическое значение индекса $n_c \approx 1.5$. В двух случаях индекс равен единице, а в остальных — меньше, с минимальным значением $n_c = 0.2$. Подобных результатов в литературе почти не встречается.

Вместе с тем, такие низкие значения критического индекса не дают оснований предполагать, что эти эрупции происходят в результате действия механизма, отличного от развития неустойчивости магнитного жгута во внешнем поле. В моделях жгутов с закрепленными в фотосфере концами возможна неустойчивость при значениях индекса меньше единицы [Olmedo and Zhang, 2010; Green et al., 2018; Filippov, 2021]. Сопоставление полученных нами значений критического индекса с теоретической кривой зависимости индекса от относительной высоты жгута в одной из моделей [Filippov, 2021] показывает похожее поведение.

Низкое значение критического индекса характерно для относительно небольших, но высоких волокон, имеющих форму, близкую к полуокружности. Правильная оценка потенциальной “эруптивности” наблюдаемых волокон важна для разработки методов прогнозирования эруптивных процессов на Солнце до начала каких-либо види-

Таблица 1. Параметры эрупций волокон, происходивших вблизи центрального меридиана

Дата	Координаты центра волокна	Время начала эрупции, UT	L , Мм	h_c , Мм	n_c
30.04.2010 г.	N 25 E 25	23:15	200	20	0.8
01.08.2010 г.	N 55 W 10	07:00	580	120	1
21.10.2010 г.	N 28 W 03	13:00	210	80	0.9
13.11.2010 г.	N 33 E 05	04:00	300	66	0.75
29.11.2010 г.	N 23 W 05	00:30	300	46	0.8
16.12.2010 г.	N 38 W 08	06:00	105	90	0.7
09.06.2011 г.	N 42 W 10	13:45	210	47	0.5
21.06.2011 г.	N 38 W 04	01:30	170	52	0.2
27.10.2011 г.	N 30 E 30	09:00	400	90	1

мых проявлений начала эрупции. Такая оценка может дать, вероятно, самый заблаговременный признак возможных возмущений космической погоды.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен сотрудникам Global Oscillation Network Group (GONG) Национальной Солнечной обсерватории США и научным группам проектов SOHO, STEREO и SDO за возможность доступа к материалам наблюдений. SOHO – совместный проект ESA и NASA. STEREO – третья миссия NASA в рамках программы Solar Terrestrial Probes. SDO – миссия NASA в рамках программы Living With a Star.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Мартин С.Ф., Рамзей Г.Е.* Раннее обнаружение больших солнечных вспышек в H α / Наблюдения и прогноз солнечной активности. Ред. П. Мак-Интош, М. Драйер. Пер. с англ. М.: Мир. С. 301–388. 1976.
- *Молоденский М.М., Филиппов Б.П.* Быстрое движение волокон в солнечных активных областях. II // Астрон. журн. Т. 64. № 5. С. 1079–1087. 1987.
- *Осовец С.М.* Плазменный виток в электромагнитном поле / Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций. Т. 2. Ред. М.А. Леонтович. М.: изд. АН СССР. С. 238–241. 1958.
- *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. М.: Наука, 736 с. 1972.
- *Филиппов Б.П.* Эруптивные процессы на Солнце. М.: Физматлит, 216 с. 2007.
- *Филиппов Б.П., Ден О.Г.* Высота протуберанцев и вертикальный градиент магнитного поля // Письма в Астрон. журн. Т. 26. № 5. С. 384–390. 2000.
- *Aggarwal A., Schanche N., Reeves K.K., Kempton D., An-gryk R.* Prediction of solar eruptions using filament metadata // *Astrophys. J. Suppl.* V. 236. P. 15. 2018. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/aab77f>
- *Bateman G.* MHD Instabilities. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 270 p. 1978.
- *Cheng X., Hao Q., Ding M.D., Liu K., Chen P.F., Fang C., Liu Y.D.* A two-ribbon white-light flare associated with a failed solar eruption observed by ONSET, SDO, and IRIS // *Astrophys. J.* V. 809. P. 46. 2015. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/809/1/46>
- *Demoulin P., Aulanier G.* Criteria for Flux Rope Eruption: Non-equilibrium Versus Torus Instability // *Astrophys. J.* V. 718. P. 1388–1399. 2010. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/718/2/1388>
- *Dodson H.W., Hedeman E.R.* Major H α flares in centers of activity with very small or no spots // *Solar Phys.* V. 13. P. 401–419. 1970.
- *Filippov B.* A filament eruption on 2010 October 21 from three viewpoints // *Astrophys. J.* V. 773. V. 10. 2013. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/773/1/10>
- *Filippov B.* Failed prominence eruptions near 24 cycle maximum // *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* V. 494. P. 2166–2177. 2020. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa896>
- *Filippov B.* Critical decay index for eruptions of ‘short’ filaments // *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* V. 503. P. 3926–3939. 2021. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab756>
- *Filippov B.P., Den O.G.* A critical height of quiescent prominences before eruption // *J. Geophys. Res.* V. 106. № 11. P. 25177–25184. 2001. <https://doi.org/10.1029/2000JA004002>
- *Filippov B., Zagnetko A.* Prominence height shows the proximity of an ejection // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 70. P. 614–620. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.08.035>
- *Grechnev V.V., Uralov A.M., Kuzmenko I.V., Kochanov A.A., Chertok I.M., Kalashnikov S.S.* Responsibility of a filament eruption for the initiation of a flare, CME, and blast wave, and its possible transformation into a bow shock // *Solar Phys.* V. 290. P. 129–158. 2015. <https://doi.org/10.1007/s11207-014-0621-8>
- *Green L.M., Török T., Vrsnak B., Manchester W., Veronig A.* The origin, early evolution and predictability of solar eruptions // *Space Sci. Rev.* V. 214. P. 46. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0462-5>
- *Holman G.D., Foord A.* Direct spatial association of an x-ray flare with the eruption of a solar quiescent filament // *Astrophys. J.* V. 804. P. 108. 2015. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/804/2/108>
- *Howard R.A., Moses J.D., Vourlidas A. et al.* Sun Earth connection coronal and heliospheric investigation (SECCHI) // *Space Sci. Rev.* V. 136. P. 67–115. 2008. <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9341-4>
- *Kleint L., Battaglia M., Reardon K., Dalda A.S., Young P.R., Krucker S.* The fast filament eruption leading to the X-flare on 2014 March 29 // *Astrophys. J.* V. 806. P. 9. 2015. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/806/1/9>
- *Kliem B., Török T.* Torus Instability // *Phys. Rev. Lett.* V. 96. № 25. P. 255002. 2006. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.255002>
- *Koleva K., Duchlev P., Dechev M., Miteva R., Kozarev K., Veronig A., Temmer M.* Filament eruptions associated with flares, coronal mass ejections and solar energetic particle events / Proc. of Tenth Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere”. Primorsko, Bulgaria, June 4–8. Ed. K. Georgieva, B. Kirov, D. Danov. P. 19–24. 2018.
- *Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J. et al.* The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Solar Phys.* V. 275. P. 17–40. 2012. <https://doi.org/10.1007/s11207-011-9776-8>
- *McCauley P.I., Su Y.N., Schanche N., Evans K.E., Su C., McKillop S., Reeves K.K.* Prominence and filament eruptions observed by the Solar Dynamics Observatory: Statistical properties, kinematics, and online catalog // *Solar Phys.* V. 290. P. 1703–1740. 2015. <https://doi.org/10.1007/s11207-015-0699-7>
- *Olmedo O., Zhang J.* Partial torus instability // *Astrophys. J.* V. 718. P. 433–440. 2010. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/718/1/433>

- Scherrer P.H., Bogart R.S., Bush R.I. et al. The Solar oscillations investigation – Michelson Doppler Imager // Solar Phys. V. 162. P. 129–188. 1995.
<https://doi.org/10.1007/BF00733429>
- Schou J., Scherrer P.H., Bush R.I. et al. Design and ground calibration of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) instrument on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // Solar Phys. V. 275. P. 229–259. 2012.
<https://doi.org/10.1007/s11207-011-9842-2>
- Sterling A.C., Moore R.L. Slow-rise and fast-rise phases of an erupting solar filament, and flare emission onset // Astrophys. J. V. 630. P. 1148–1159. 2005.
<https://doi.org/10.1086/432044>
- van Tend W., Kuperus M. The development of coronal electric current systems in active regions and their relation to filaments and flares // Solar Phys. V. 59. P. 115–127. 1978.
<https://doi.org/10.1007/BF00154935>
- Zirin H., Lackner D.R. The solar flares of August 28 and 29, 1966 // Solar Phys. V. 6. P. 86–103. 1969.
<https://doi.org/10.1007/BF00146799>
- Zuccarello F.P., Seaton D.B., Mierla M., Poedts S., Rachmeler L.A., Romano P., Zuccarello F. Observational evidence of torus instability as trigger mechanism for coronal mass ejections: the 2011 August 4 filament eruption // Astrophys. J. V. 785. P. 88. 2014a.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/785/2/88>
- Zuccarello F.P., Seaton D.B., Filippov B., Mierla M., Poedts S., Rachmeler L.A., Romano P., Zuccarello F. Erratum: “Observational evidence of torus instability as trigger mechanism for coronal mass ejections: the 2011 August 4 filament eruption” (2014, ApJ, 785, 88) // Astrophys. J. V. 795. P. 175. 2014b.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/785/2/175>