

## ВЫСОТА СОЛНЕЧНОГО ВОЛОКНА ПЕРЕД ЭРУПЦИЕЙ

**Б. П. Филиппов**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова  
(ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия*

Поступила в редакцию

Анализируется соотношение высоты солнечного волокна над фотосферой перед эрупцией 21 октября 2010 г. с критической высотой устойчивого равновесия магнитного жгута в корональном магнитном поле. Наблюдения космических обсерваторий SDO (Solar Dynamic Observatory), SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) и STEREO (Solar Terrestrial Relations Observatory) с различных точек зрения в пространстве дают возможность измерить эти параметры с высокой точностью. Показано, что высота волокна медленно возрастала в течение нескольких дней и эрупция наступила, когда она достигла критического значения 80 Мм.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Солнечными волокнами называют темные неровные полосы, видимые на диске Солнца на фильтрограммах в сильных хромосферных линиях и в континууме в крайнем ультрафиолетовом диапазоне. Они представляют собой узкие облака плотной плазмы с примерно хромосферной температурой, висящие в горячей короне. Самое примечательное свойство волокон то, что они вытянуты вдоль линии раздела полярностей фотосферного магнитного поля. Волокна рассеивают излучение фотосферы в сильных хромосферных линиях и поэтому темнее, чем хромосфера в среднем. На лимбе те же образования становятся ярче фона, поскольку яркость короны в видимой области спектра мала. В этом случае их называют протуберанцами. Хотя протуберанцы были известны по наблюдениям солнечных затмений за десятки лет до появления спектрогелиографов и узкополосных фильтров, сделавших доступным наблюдения волокон, и этот термин исторически охватывает более широкий явлений (вспышечные и послевспышечные петли и аркады, выбросы, яркие петельные системы), ниже "протуберанец" и "волокно" будут употребляться в основном как синонимы, обозначающие один и тот же физический объект, с небольшим, может быть, оттенком специфики ракурса наблюдений – на лимбе или на диске.

Протуберанцы активных областей едва выступают над средним уровнем хромосферы. Их высота обычно в пределах 10 Мм [1, 2]. Спокойные протуберанцы вне

активных областей достигают значительно больших высот, до 200 Мм [3]. Размеры и высота спокойных протуберанцев растут со временем на протяжении их существования. Общее количество протуберанцев уменьшается экспоненциально с увеличением высоты в интервале 10-100 Мм [4]. Средняя высота протуберанцев около 30 Мм [5, 6]. Изменение средней за год высоты протуберанцев с циклом активности было обнаружено Кантю и др. [7] и затем подтверждено Макаровым [8] по данным индийской обсерватории Кодайканал за период с 1912 по 1974 год. Максимальная высота протуберанцев достигается вблизи максимума активности или на два года раньше. Кроме того, отмечается систематическое увеличение средней высоты протуберанцев от 25 Мм до 33 Мм за рассматриваемый период. Ким и др. [9, 10] также находят зависимость средней высоты протуберанцев от фазы цикла для второй половины 21-го цикла и отмечают наличие двух максимумов в распределении протуберанцев по высоте, соответствующих 18 Мм и 33 Мм. Выделив только высокоширотные протуберанцы, составляющие почти непрерывную полярную корону вокруг полярных шапок, Макаров и др. [11, 12] нашли, что по мере дрейфа глобальной нейтральной линии к полюсу высота протуберанцев над ней уменьшается более чем вдвое с 35 Мм до 16 Мм.

Поскольку холодное и плотное вещество протуберанцев вероятнее всего удерживается в короне от падения в хромосферу магнитным полем, свойства поля должны определять условия равновесия волокон и в частности их высоту. Поэтому неслучайны попытки рассматривать высоту протуберанцев как в определенном смысле магнитную характеристику [13, 14]. Предполагалось, например, что высота протуберанцев характеризует напряженность фонового магнитного поля [11], или что высотное распределение протуберанцев связано с распределением горизонтального градиента продольного магнитного поля вблизи линии раздела полярностей [15 - 18].

В рамках традиционных двумерных магнитных моделей протуберанцев, равновесие возможно, в принципе, на любой высоте. Вопрос - в устойчивости равновесия. Классическая модель Киппенхана-Шлютера [19] предполагает неограниченную протяженность протуберанца по высоте. Ограничение вертикального размера приводит к противоречивым условиям устойчивости по горизонтали и вертикали [20]. В моделях, представляющих протуберанцы в виде магнитного жгута [21, 22] предельная высота устойчивого равновесия определяется пространственными характеристиками магнитного поля фотосферных источников. Переход жгута из устойчивого в неустойчивое состояние называется катастрофической потерей равновесия и считается причиной внезапных эрупций протуберанцев [23 - 27].

Если аппроксимировать зависимость коронального магнитного поля от высоты  $h$  в каком-то интервале степенной функцией

$$B(h) = C h^{-n}, \quad (1)$$

то для показателя  $n$  можно определить критическое значение устойчивости равновесия магнитного жгута в таком поле. Для тонкого длинного жгута, который можно приближено считать прямым линейным электрическим током, критическое значение  $n_c = 1$  [22, 23]. На изогнутый жгут действует дополнительная электромагнитная сила, в направлении от центра кривизны [28]. В этом случае неустойчивость, названная "тороидальной неустойчивостью" [29], наступает при значении показателя убывания поля (декремента)  $n_c = 1.5$ . Для жгута с существенным поперечным сечением, которое к тому же увеличивается при эрупции, критический показатель лежит в интервале  $1.1 \div 1.3$  [30].

При наличии крупномасштабных источников поля, вблизи фотосферы изменения поля будут небольшие  $n \approx 0$ . На большом удалении поле должно иметь дипольный характер  $n \approx 3$ . Таким образом, в любом заданном поле существует критическая высота  $h_c$ , где достигается критическое значение  $n_c$ . Выше критической высоты спокойные протуберанцы не могут существовать.

Измерения магнитного поля в солнечной короне сопряжены с очень большими техническими трудностями и производятся в настоящее время лишь эпизодически в режиме пробных экспериментов [31]. Оценить величину показателя убывания поля с высотой можно только на основании экстраполяции фотосферного магнитного поля в корону в потенциальном или бессиловом приближении [20, 32 – 34].

Сравнение действительной высоты волокна над фотосферой с рассчитанной предельной высотой дает информацию о запасе устойчивости волокна, готовности его к эрупции. Проблема, однако, в том, что при наблюдениях только с поверхности Земли и околоземной орбиты, нужно сравнивать две величины, каждая из которых наиболее достоверно может быть определена в тот момент, когда вторая неизвестна. Высота волокна лучше всего определяется на лимбе, когда оно видно как протуберанец, но при этом магнитное поле на участке фотосферы под ним невозможно измерить из-за того, что поверхность фотосферы параллельна лучу зрения. Наиболее благоприятные условия для магнитных измерений возникают, когда область находится вблизи центра диска или хотя бы вблизи центрального меридиана, то есть через четверть оборота Солнца или с интервалом времени около недели. Для спокойных протуберанцев можно ожидать, что их высота за этот срок существенно не изменится. В отношении протуберанцев накануне эрупции, такое предположение недопустимо. Существуют методы оценки высоты волокон над хромосферой, когда они находятся на диске, с использованием изменений проекции при вращении Солнца [35] и измерения наклона плоскости симметрии волокна к вертикали [36, 37]. Хотя все они имеют весьма ограниченную точность, с их помощью

было проанализировано распределение спокойных и эруптивных протуберанцев по параметру отношения высоты волокна к критической высоте  $h_p/h_c$  [38]. На рис. 1 видно, что по отношению к этому параметру протуберанцы отчетливо разделяются на два семейства, что делает его перспективным для прогнозирования эруптивных явлений.

В данной работе мы проследим за предэруптивным состоянием и эрупцией крупного волокна, которая произошла 21 октября 2010 г. вблизи солнечного центрального меридиана для наблюдателя на Земле. Такое положение волокна на диске было благоприятным для надежных измерений фотосферных магнитных полей под волокном, тогда как наблюдения двух аппаратов STEREO (Solar Terrestrial Relations Observatory), для каждого из которых волокно было на лимбе, обеспечили детальной информацией о высоте волокна над фотосферой. Таким образом, мы можем сравнивать действительную высоту волокна с критическими характеристиками коронального магнитного поля, рассчитанными для точно тех же самых моментов времени.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ ЭРУПЦИИ ВОЛОКНА 21 ОКТЯБРЯ 2010 Г.

Хорошо развитое волокно промежуточного типа, расположенное между активными областями AR 11113 и AR 11118, начало внезапно подниматься около 13 UT 21 октября 2010 г. Незадолго до эрупции волокно находилось почти точно на центральном меридиане в интервале широт  $15^\circ \text{N} - 35^\circ \text{N}$  (рис. 2). Направление оси волокна составляло около  $30^\circ$  с меридианом. Эрупция была полной, никаких следов волокна на  $\text{H}\alpha$ -фильтограммах 22 октября не видно. Наблюдения в линии  $\text{H}\alpha$  на Солнечной обсерватории Канцельхойе захватили только начальную фазу эрупции до 14 UT. Полную картину можно составить благодаря наблюдениям космических обсерваторий.

Обсерватория SDO (Solar Dynamic Observatory) с геостационарной орбиты наблюдала эрупцию на диске Солнца комплексом телескопов AIA (Atmospheric Imaging Assembly; [39]) в различных участках крайнего ультрафиолетового спектра. Благодаря поглощению в ультрафиолетовом континууме волокно различимо в разных каналах телескопов AIA, отображающих излучение корональной плазмы с температурой от 1 до 10 МК, но наиболее информативным для данного события является канал  $304 \text{ \AA}$ , регистрирующий излучение переходной области (рис. 3).

Телескопы космической обсерватории STEREO [40, 41] впервые позволили наблюдать Солнце с разных углов зрения. Осенью 2010 г. два аппарата STEREO находились почти напротив друг друга на угловом удалении в  $84^\circ$  (STEREO A) и  $80^\circ$  (STEREO B) от Земли вдоль ее орбиты. Для STEREO A волокно в момент начала эрупции

находилось точно на лимбе, а для STEREO B у самого лимба, частично на видимой части диска (рис 3).

Эрупция волокна привела к появлению коронального выброса (рис. 4), который наблюдался коронографами STEREO/COR2 и SOHO/LASCO C2 (Solar and Heliospheric Observatory / Large Angle Spectrometric Coronagraph) [42]. Последний находится на линии Солнце-Земля в лагранжевой точке L1. Тот факт, что в его поле зрения выброс распространяется в северо-западном секторе под углом примерно 45° к экваториальной плоскости, свидетельствует о том, что эрупция волокна происходила не в меридиональной плоскости, а с большим отклонением к западу.

### 3. ВЫСОТА ВОЛОКНА НАД ФОТОСФЕРОЙ

Первые оценки высоты волокна можно сделать при его появлении на лимбе на изображениях SDO/AIA. Высота верхних прядей волокна над лимбом составляла 22 Мм в 13 UT 13 октября, 41 Мм в 14 UT 14 октября и 45 Мм в 00 UT 15 октября. Поскольку часть протуберанца 13 и 14 октября скрыта за лимбом, эти значения следует скорректировать. Примем за середину волокна точку на широте 25° N. Она находилась на центральном меридиане 21 октября в 05 UT. Учитывая среднюю синодическую угловую скорость вращения волокон на этой широте 13,38 град/сут. [35], получим долготы волокна в указанные моменты наблюдения  $\lambda = 102,6^\circ$  E (за лимбом),  $\lambda = 88,7^\circ$  E и  $\lambda = 83,1^\circ$  E.

Действительная высота протуберанца над фотосферой  $H$ , как следует из рис. 5, может быть определена следующим образом. По теореме синусов для треугольника POP'

$$\frac{H + R}{\sin \gamma} = \frac{h + R}{\sin \beta}, \quad (2)$$

где  $R$  – солнечный радиус,  $h$  – наблюдаемая высота протуберанца над лимбом. Учитывая, что  $\gamma = \pi/2 + \delta - \delta'$ , а  $\beta = \pi - \lambda - \delta$ , получим

$$H = (h + R) \frac{\cos(\delta - \delta')}{\sin(\lambda + \delta)} - R. \quad (3)$$

Поскольку  $\delta \approx \delta'$  и  $\delta \ll \lambda$ , для нашей цели вполне достаточно точности приближенной формулы

$$H = (h + R) \frac{1}{\sin \lambda} - R. \quad (4)$$

Тогда высоты протуберанца 13, 14 и 15 октября будут 40 Мм, 41 Мм и 50 Мм соответственно.

Ближе к началу эрупции информация о высоте волокна может быть получена по изображениям STEREO. Для аппарата STEREO А протуберанец появился из-за восточного лимба около 11 UT 19 октября. Хотя для STEREO В все предшествующие эрупции дни волокно находилось на диске, оно стало достаточно контрастным и хорошо различимым только когда приблизилось к западному лимбу 20 октября. На рис. 6 приведена высота протуберанца над фотосферой с учетом эффекта проекции по формуле (4). До 00 UT 21 октября измерения высоты протуберанца производились на постоянной широте 25° N, поскольку эти данные требовали больших поправок за проекцию. После 00 UT 21 октября мы следили за самым высоким над лимбом участком протуберанца. Его положение менялось из-за изменения формы протуберанца при его активизации и эрупции. Резкие скачки на кривой связаны с появлением и исчезновением отдельных деталей в результате внутренних движений вещества в протуберанце. В те моменты времени, когда можно было использовать (по условиям проекции и наличию данных) снимки обоих аппаратов STEREO, результаты совпадают с хорошей точностью.

Таким образом, измеренная высота протуберанца с 13 по 20 октября менялась в пределах между 40 Мм и 50 Мм, вероятно, из-за появления и исчезновения отдельных нитей тонкой структуры вследствие внутренних движений. В последние сутки перед эрупцией наблюдается рост высоты до 75-80 Мм. После 13 UT 21 октября протуберанец начинает плавно подниматься с ускорением, не превышающим  $1 \text{ м с}^{-2}$ , достигая максимальной скорости в поле зрения STEREO/SECCHI EUVI около  $40 \text{ км с}^{-1}$ .

#### 4. ДЕКРЕМЕНТ УБЫВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И КРИТИЧЕСКАЯ ВЫСОТА

Потенциальное магнитное поле в короне может быть рассчитано решением внешней краевой задачи Неймана. Поскольку нас интересует магнитное поле на высоте протуберанца, которая мала по сравнению с радиусом Солнца, можно пренебречь сферичностью и воспользоваться известным решением для полупространства с плоской границей (см., например, [43])

$$\mathbf{B}(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \iint_S \frac{B_n(x', y', 0) \mathbf{r}}{r^3} dx' dy', \quad (5)$$

где  $B_n(x', y', 0)$  - нормальная компонента магнитного поля на плоскости  $S$ ,  $\mathbf{r}$  - радиус-вектор от некоторой точки поверхности до данной точки в короне. Реальные измерения

магнитного поля на Солнце дают среднее значение компоненты вдоль луча зрения на некоторой площадке, размеры которой определяются разрешением магнитографа. В пределах этой небольшой прямоугольной площадки интегралы в (5) можно вычислить аналитически [44], и поле в данной точке находится суммированием вклада всех площадок на плоскости.

Для расчетов декремента убывания горизонтальной компоненты потенциального магнитного поля  $B_t$  фотосферных источников, определяющей вертикальное равновесие магнитного жгута,

$$n = -\frac{\partial \ln B_t}{\partial \ln h}, \quad (6)$$

воспользуемся данными измерений прибором SOHO/MDI (Michelson Doppler Imager; [45]). Вырезая из магнитограммы полного диска прямоугольную область вокруг изучаемого волокна, мы пренебрегаем вкладом участков за ее пределами. Это оправданно, если размеры области намного больше, чем высота волокна, или если основные источники поля (активные области) находятся в пределах вырезанной области.

Хотя волокно перед эрупцией находилось на центральном меридиане, его широта обуславливает отличие направления нормали к участку фотосферы под ним от луча зрения с Земли. В предыдущие дни будет сказываться и отклонение по долготе. За нормальную компоненту поля, необходимую для решения задачи Неймана, мы будем принимать проекцию продольного (вдоль луча зрения) поля на нормаль. Кроме того, для того чтобы воспользоваться методикой интегрирования, предложенной в работе [44], необходимо создать краевой массив с одинаковыми линейными размерами ячеек. Такая сетка проектируется на сферическую поверхность фотосферы и для каждой ячейки принимается значение поля ближайшего пиксела на магнитограмме. В результате мы получаем прямоугольную область с одинаковыми квадратными ячейками, как она выглядела бы, если бы находилась в центре солнечного диска.

На рис. 7 показано распределение декремента убывания потенциального магнитного поля на разной высоте в области, окружающей волокно с 18 по 22 октября (магнитограммы за 19 октября отсутствуют). Области  $n > 1$  залиты серым цветом, области  $n < 1$  – белые. На каждой высоте рассчитано положение линий раздела полярностей (ЛРП), на которых могут находиться в равновесии магнитные жгуты. Фактически волокно существует только на некотором участке ЛРП, отмеченном двумя короткими отрезками на фрагменте, соответствующем 21 октября в верхнем ряду рис. 7. В этом ряду участок с волокном расположен в области  $n < 1$  (белой), в которой равновесие магнитного жгута устойчиво. С увеличением высоты серые площадки расширяются и пересекают ЛРП на

участке с волокном. Высота, на которой граница неустойчивой зоны (серой) касается ЛРП, является предельной критической высотой для волокна. Хотя магнитное поле не сильно менялось вблизи волокна в исследуемые дни, о чем свидетельствует большое сходство распределений декремента убывания поля и формы ЛРП, значения критической высоты несколько различаются. 18 октября она составляла 89 Мм, 20 и 21 октября – 81 Мм, а 22 октября – 72 Мм (см. рис. 7). То есть фотосферное магнитное поле медленно менялось таким образом, что критическая высота устойчивого равновесия постепенно снижалась. Вместе с тем, фактическая высота волокна над фотосферой слегка увеличивалась в дни, предшествующие эрупции. Сравнение рисунков 6 и 7 показывает очень хорошее численное совпадение критической высоты 21 октября и высоты, с которой волокно начало быстро подниматься вверх.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках модели, в которой вещество протуберанца содержится внутри магнитного жгута, высота протуберанца над фотосферой является величиной, характеризующей его устойчивость. Эту величину следует сопоставлять с предельной высотой устойчивого равновесия магнитного жгута в данном корональном магнитном поле, которая определяется вертикальным градиентом поля. Для жгутов с прямой осью или осью в виде дуги окружности неустойчивость наступает на высоте, на которой декремент убывания коронального поля принимает значения  $n = 1 \div 1.5$ .

Проверить выполнение данного критерия для реальных волокон на Солнце затруднительно при наличии наблюдений только из одной точки (с поверхности Земли и околоземной орбиты). Ракурс, благоприятный для определения высоты волокна, когда оно на лимбе, непригоден для измерения фотосферного магнитного поля под ним, и наоборот, положение волокна вблизи центра солнечного диска, когда нормаль к фотосфере направлена вдоль луча зрения, благоприятно для магнитографии, но делает измерение высоты волокна трудной задачей. Запуск двух идентичных аппаратов миссии STEREO, расходящихся в противоположные стороны вдоль земной орбиты, позволил впервые получать ультрафиолетовые изображения Солнца с разных углов зрения. На диске волокна в ультрафиолетовых линиях различимы гораздо хуже, чем, скажем, в линии  $H\alpha$ , но на лимбе протуберанцы хорошо видны, особенно в канале 304 Å. Поэтому самая удачная ситуация для анализа условий начала эрупции, когда волокно эруптирует из области, близкой к центру диска для земного наблюдателя.

Эрупция волокна 21 октября 2010 г. произошла как раз на центральном меридиане. Она наблюдалась на диске космическими обсерваториями SDO и SOHO. Начальная фаза



эрупции была также зафиксирована наземной Солнечной обсерваторией в Канцельхойе. Для обоих аппаратов STEREO волокно располагалось на лимбе, и динамика эруптивного протуберанца наблюдалась ими в деталях.

Мы рассчитали распределение декремента убывания потенциального поля в короне с 18 по 22 октября и определили критическую высоту, на которой изолиния  $n = 1$  касается линии раздела полярностей. В течение пяти дней эта величина медленно убывала с 89 Мм до 72 Мм. В то же время высота волокна над фотосферой с 13 по 21 октября постепенно возрастала с 40 Мм до 80 Мм. Эрупция произошла, когда высота волокна достигла критического значения. В отличие от предыдущих исследований, в данной работе высота волокна измерялась с хорошей точностью, благодаря наблюдениям с трех направлений, составляющих друг с другом прямые углы. Данные о магнитном поле тоже обладают большой достоверностью, поскольку исследуемая область располагалась на магнитограмме на центральном меридиане. Хорошее совпадение высоты, с которой волокно начало ускоренно подниматься, с критической высотой для прямого магнитного жгута, свидетельствует о том, что сила, связанная с кривизной оси не играет принципиальной роли в равновесии реального жгута.

Проанализированное событие показывает, что отношение высоты протуберанца к критической высоте является хорошим параметром, характеризующим устойчивость равновесия волокна в магнитном поле короны. Мониторинг этого параметра может быть инструментом прогнозирования эруптивных явлений. Для практической реализации этого метода с хорошей точностью необходимы наблюдения Солнца с нескольких углов зрения.

Автор благодарен сотрудникам Солнечной обсерватории Канцельхойе, научным группам проектов STEREO, SOHO и SDO за возможность доступа к материалам наблюдений. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 12-02-00008, 12-02-92692).

142092, Москва, Троицк, Калужское шоссе, 4, ИЗМИРАН

Филиппов Борис Петрович

Тел.: 851 97 32

Факс: 851 01 24

e-mail: bfilip@izmiran.ru

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. Schmieder, in: *Dynamics and Structure of Solar Prominences*, eds J. L. Ballester, E. R. Priest (Mallorca: Universitat de les Illes Balears, 1987), p. 5.
2. B. Schmieder, in: *Dynamics and Structure of Quiescent Solar Prominences*, ed E. R. Priest (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1989), p. 15.
3. B. Rompolt, Hvar Obs. Bull. **14**, 37 (1990).
4. R. Ananthakrishnen, *Astrophys. J.* **133**, 969 (1961).
5. С. О. Обашев, Изв. Крымск. астрофиз. обсерв. **29**, 118 (1963).
6. В.С. Дерменджи́ев, *Астрофизические исследования* (София), № 2, 8 (1977).
7. A. M. Cantu, G. Godoli, G. Poletto, *Mem. Soc. Astr. Ital.* **38**, 367 (1968).
8. В. И. Макаров, *Солнечные данные*, № 4, 100 (1983).
9. И. С. Ким, В. Ю.Клепиков, С. Кучми, и др., *Солнечные данные*, № 1, 75 (1988).
10. И. С. Ким, В. Ю.Клепиков, С. Кучми, и др., *Солнечные данные*, № 5, 77 (1988).
11. В. И. Макаров, К. С. Тавастшерна, Е. И. Давыдова, К. Р. Сивараман, *Солнечные данные*, № 3, 90 (1992).
12. V. I. Makarov, *Solar Phys.* **150**, 359 (1994).
13. J. L. Leroy, V. Vommier, S. Sahal-Brechot, *Astron. Astrophys.* **131**, 33 (1984).
14. И. С. Ким, В. Ф.Увакина, в сб.: *Атмосфера Солнца, межпланетная среда, атмосфера планет*, ред. Р. А. Гуляев (Москва: ИЗМИРАН, 1989), с. 125.
15. В. П. Максимов, Л. В. Ермакова, *Астрон. журн.* **62**, 558 (1985).
16. С. А. Язев, Г. М. Хмыров, *Солнечные данные*, № 12, 75 (1987).
17. Б. А. Иошпа, Е. Х. Куликова, в сб.: *Солнечные магнитные поля и корона*, **1**, ред. Р. Б. Теплицкая (Новосибирск: Наука, 1989), с. 167.
18. В. П. Максимов, А. А. Прокопьев, *Астрон. журн.* **70**, 1099 (1993).
19. R. Kippenhahn, A. Schluter, *Zitschr. Astrophys.* **43**, 36 (1957).
20. Б. П. Филиппов, О. Г. Ден, *Письма в Астрон. журн.* **26**, 384 (2000).
21. M. Kuperus, M. A. Raadu, *Astron. Astrophys.* **31**, 189 (1974).
22. W. Van Tend, M. Kuperus, *Solar Phys.* **59**, 115 (1978).
23. М. М. Молоденский, Б. П. Филиппов, *Астрон. журн.* **64**, 1079 (1987).
24. E. R. Priest, T. G. Forbes, *Solar Phys.* **126**, 319 (1990).
25. T. G. Forbes, P. A. Isenberg, *Astrophys. J.* **373**, 294 (1991).
26. J. Lin, T. G. Forbes, P. A. Isenberg, P. Demoulin, *Astrophys. J.* **504**, 1006 (1998).
27. B. Schmieder, P. Demoulin, G. Aulanier, 2013 in press
28. G. Bateman, *MHD Instabilities* (Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 1978).

29. B. Kliem, T. Török, Phys. Rev. Lett., **96**(25), 255002 (2006).
30. P. Demoulin, G. Aulanier, Astrophys. J. **718**, 1388 (2010).
31. S. Tomczyk, in: *Science with Large Solar Telescopes*, Proc. IAU Special Session 6, 22-24 August, 2012, online at <http://www.arcetri.astro.it/IAUSpS6>, id.E2.14.
32. B. P. Filippov, O. G. Den, J. Geophys. Res. **106**, 25177 (2001).
33. B. Filippov, A. Zagnetko, J. Atm. Sol.-Terr. Phys. **70**, 614 (2008).
34. A. Nindos, S. Patsourakos, T. Wiegelmann, Astrophys. J. Lett. **748**, L6 (2012).
35. B. Vrsnak, D. Rosa, H. Bozic, et al., Solar Phys. **185**, 207 (1999).
36. M. d'Azambuja, L. d'Azambuja, Ann. Observ. Paris, Meudon **6**, Fasc. VII (1948).
37. А. М. Загнетко, Б. П. Филиппов, О. Г. Ден, Астрон. журн. **82**, 474 (2005).
38. Б. П. Филиппов, А. М. Загнетко, А. Аджабширизаде, О. Г. Ден, Астрон. вестн. **40**, 319 (2006).
39. J. R. Lemen, A. M. Title, D. J. Akin, et al., Solar Phys. **275**, 17 (2012).
40. J.-P. Wuelser, J. R. Lemen, T. D. Tarbell, et al., Proc. SPIE, 5171, 111 (2004).
41. R. A. Howard, J. D. Moses, A. Vourlidas, et al., Space Sci. Rev., **136**, 67 (2008).
42. G. E. Brueckner, R. A. Howard, M. J. Koomen, et al., Solar Phys. **162**, 357 (1995).
43. А. Н. Тихонов, А. А. Самарский, *Уравнения математической физики* (М.: Наука, 1972), с. 363.
44. О. Г. Ден, О. Е. Ден, Е. А. Корницкая, М. М. Молоденский, Солнечные данные, № 1, 97 (1979).
45. P. H. Scherrer, R. S. Bogart, R. I. Bush, et al., Solar Phys. **162**, 129 (1995).

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

**Рис. 1.** Распределение спокойных и эруптивных протуберанцев по параметру отношения высоты волокна к критической высоте  $h_p/h_c$ .

**Рис. 2.** Положение волокна незадолго до эрупции на солнечном диске (а), относительно фотосферных магнитных полей (б) и относительно линии раздела полярностей на высоте 48 Мм. Использована  $H\alpha$ -фильтрограмма Солнечной обсерватории Канцельхойе 21 октября 2010 г. в 07:50 UT и магнитограмма *SOHO/MDI* в 08:02 UT. Угловые размеры фрагментов (б) и (в) составляют  $880'' \times 645''$ .

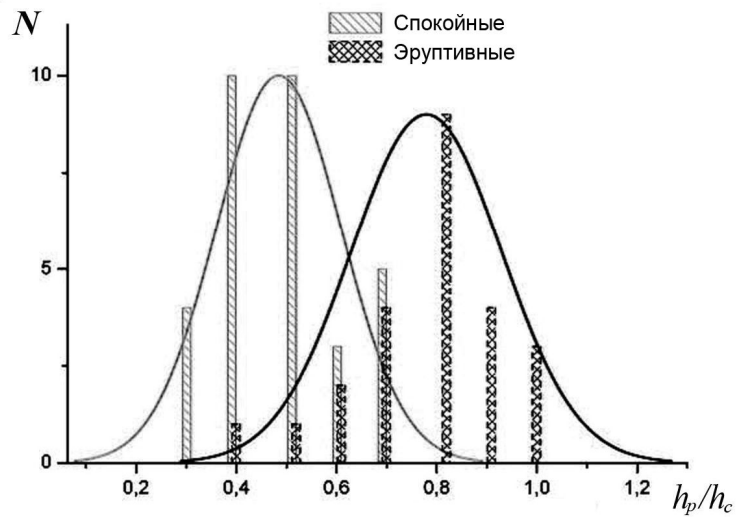
**Рис. 3.** Наблюдения эрупции волокна 21 октября в канале  $304 \text{ \AA}$  телескопов STEREO A/SECCHI EUVI (верхний ряд), SDO/AIA (средний ряд) и STEREO B/SECCHI EUVI (нижний ряд). Размер каждого кадра  $650'' \times 650''$ .

**Рис. 4.** Корональный выброс 22 октября в поле зрения коронографов STEREO A/COR2 (слева), SOHO/LASCO C2 (в центре) и STEREO B/COR2 (справа).

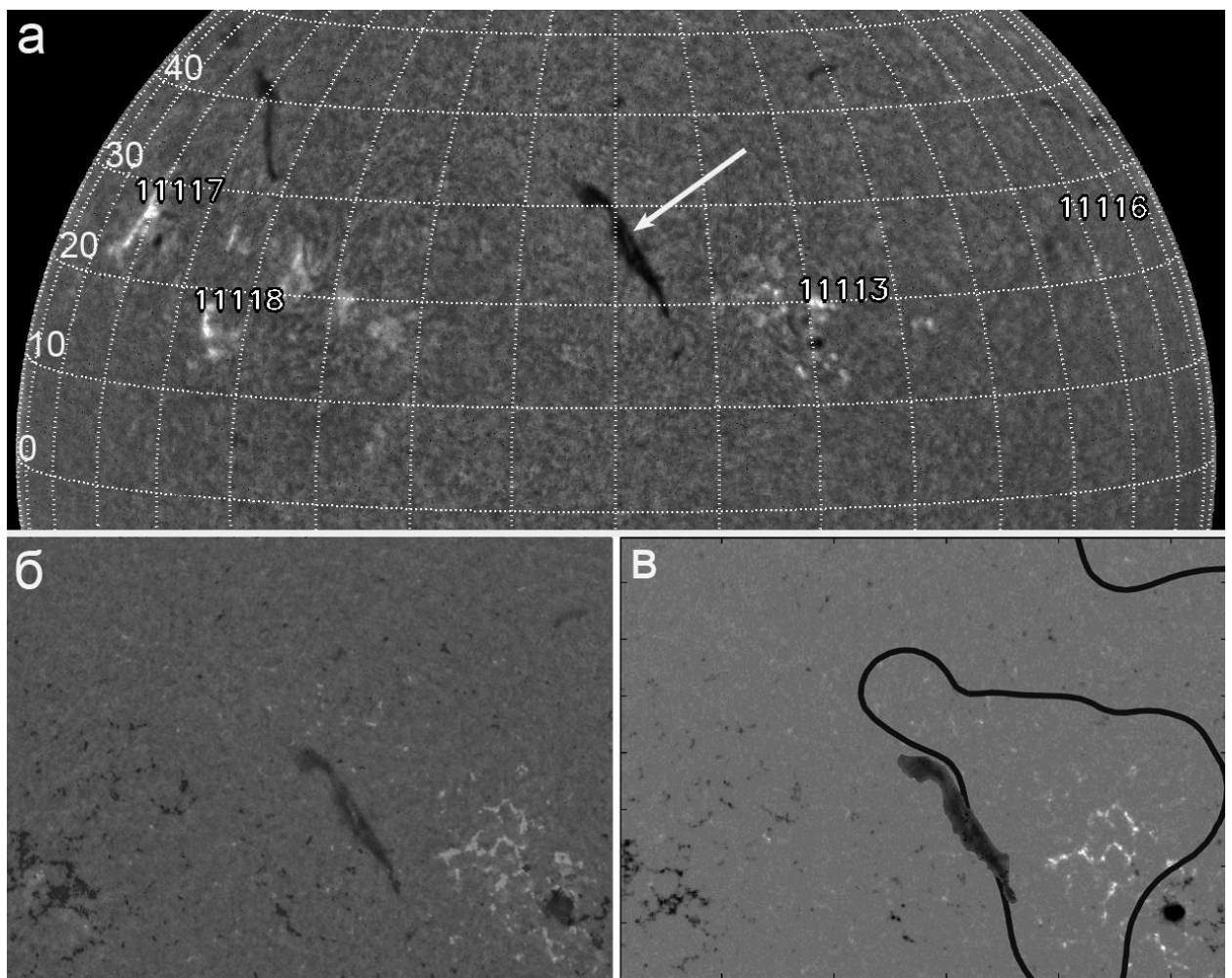
**Рис. 5.** Схематическое изображение наблюдения протуберанца за лимбом.

**Рис. 6.** Зависимость высоты верхнего края протуберанца над фотосферой от времени. Сплошная линия – по данным STEREO A/SECCHI EUVI  $304 \text{ \AA}$ , кружки – по данным STEREO B/SECCHI EUVI  $304 \text{ \AA}$ .

**Рис. 7.** Распределение декремента убывания магнитного поля на разной высоте в различные дни. Области  $n > 1$  показаны серым тоном, области  $n < 1$  – белые. Жирные линии показывают положение линий раздела полярностей (ЛРП) на соответствующих высотах. Короткие отрезки на ЛРП на высоте 72 Мм 21 октября обозначают концы волокна, видимые на фильтрограммах в линии  $H\alpha$  (см. рис. 2). Угловые размеры фрагментов в разные дни несколько различаются; для области, соответствующей 21 октября, они составляют  $880'' \times 645''$ .

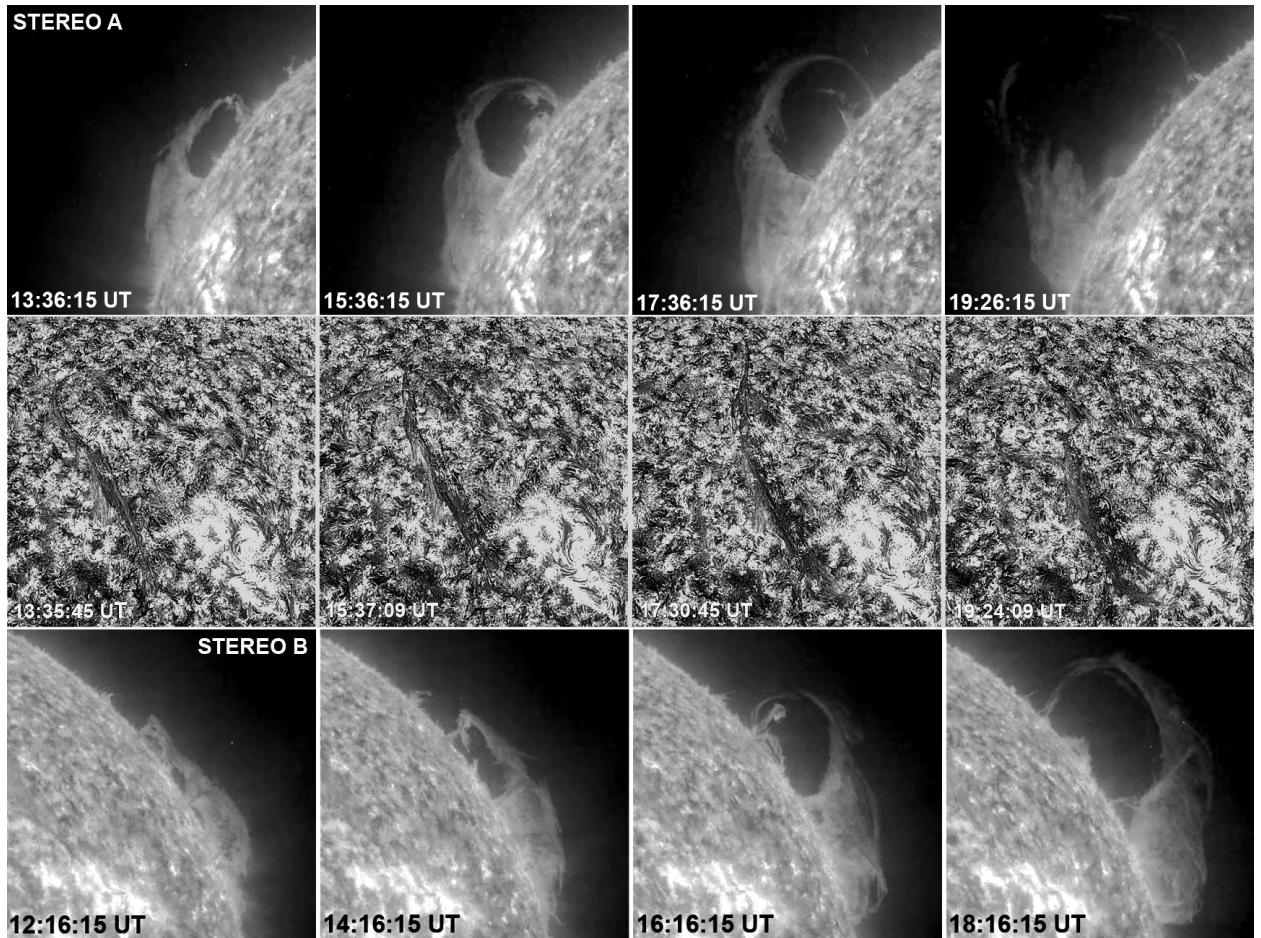


**Рис. 1.** Распределение спокойных и эруптивных протуберанцев по параметру отношения высоты волокна к критической высоте  $h_p/h_c$ .

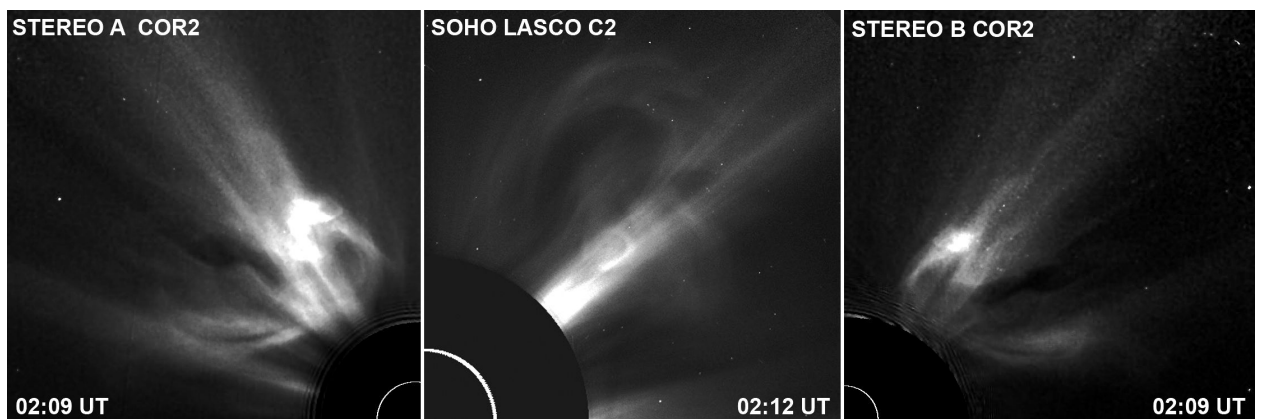


**Рис. 2.** Положение волокна незадолго до эрупции на солнечном диске (а), относительно фотосферных магнитных полей (б) и относительно линии раздела полярностей на высоте 48 Мм. Использована  $H\alpha$ -фильтрограмма Солнечной обсерватории Канцельхойе 21

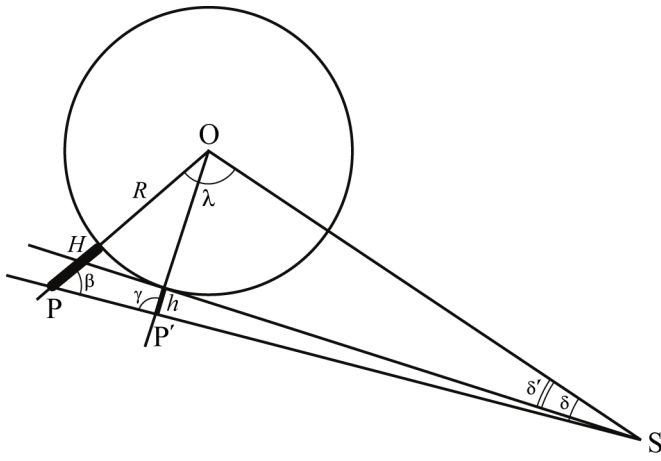
октября 2010 г. в 07:50 UT и магнитограмма *SOHO/MDI* в 08:02 UT. Угловые размеры фрагментов (б) и (в) составляют  $880'' \times 645''$ .



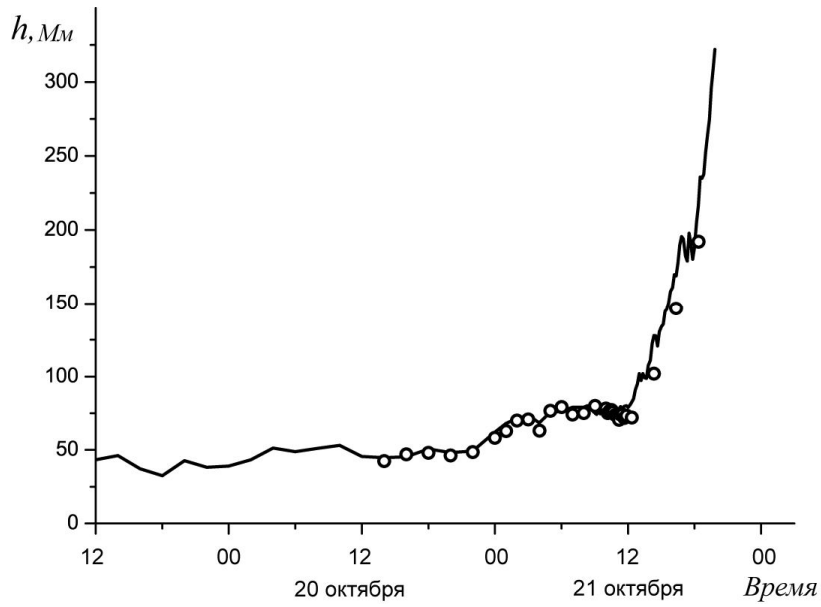
**Рис. 3.** Наблюдения эрупции волокна 21 октября в канале  $304 \text{ \AA}$  телескопов STEREO A/SECCHI EUVI (верхний ряд), SDO/AIA (средний ряд) и STEREO B/SECCHI EUVI (нижний ряд). Размер каждого кадра  $650'' \times 650''$ .



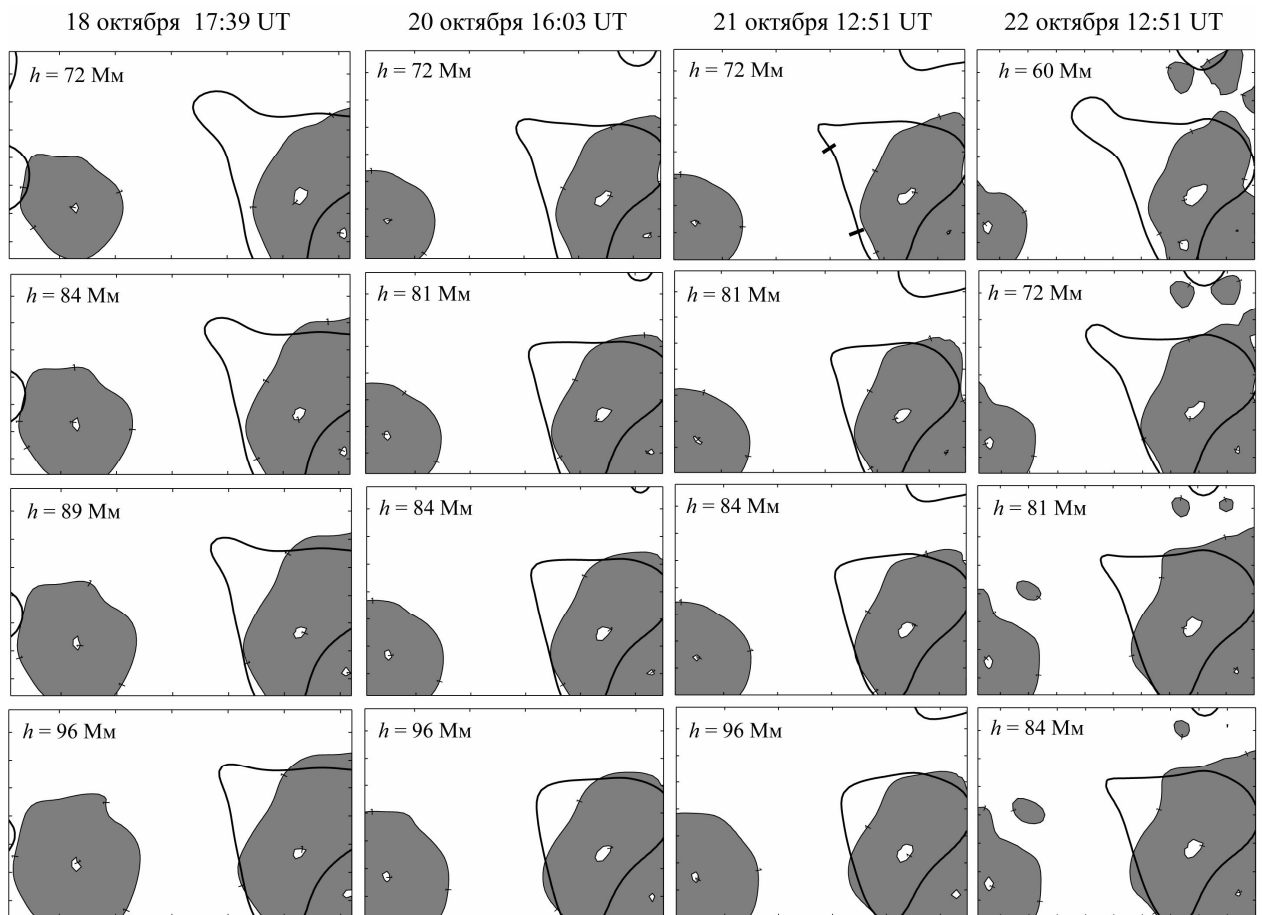
**Рис. 4.** Корональный выброс 22 октября в поле зрения коронографов STEREO A/COR2 (слева), SOHO/LASCO C2 (в центре) и STEREO B/COR2 (справа).



**Рис. 5.** Схематическое изображение наблюдения протуберанца за лимбом.



**Рис. 6.** Зависимость высоты верхнего края протуберанца над фотосферой от времени. Сплошная линия – по данным STEREO A/SECCHI EUVI 304 Å, кружки – по данным STEREO B/SECCHI EUVI 304 Å.



**Рис. 7.** Распределение декремента убывания магнитного поля на разной высоте в различные дни. Области  $n > 1$  показаны серым тоном, области  $n < 1$  – белые. Жирные линии показывают положение линий раздела полярностей (ЛРП) на соответствующих высотах. Короткие отрезки на ЛРП на высоте 72 Мм 21 октября обозначают концы волокна, видимые на фильтрограммах в линии  $H_{\alpha}$  (см. рис. 2). Угловые размеры фрагментов в разные дни несколько различаются; для области, соответствующей 21 октября, они составляют  $880'' \times 645''$ .