

УДК 523.98

ФИЗИКА СОЛНЕЧНЫХ ПОСТЭРУПТИВНЫХ АРКАД: ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НАБЛЮДЕНИЙ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РАТАН-600 И КОСМИЧЕСКОМ АППАРАТЕ STEREO

© 2011 г. М. А. Лившиц^{1*}, А. М. Урнов², Ф. Ф. Горяев^{2,3},
Л. К. Кашапова⁴, И. Ю. Григорьева⁵, Т. И. Кальтман⁶

¹Учреждение Российской академии наук Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, Троицк Московской обл., Россия

²Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия

³Бельгийская королевская обсерватория, Брюссель, Бельгия

⁴Учреждение Российской академии наук Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

⁵Учреждение Российской академии наук

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, С.-Петербург, Россия

⁶С.-Петербургский филиал Учреждения Российской академии наук
Специальной астрофизической обсерватории РАН, С.-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 14.12.2010 г.; принята в печать 27.12.2010 г.

Представлены результаты одновременных измерений потоков излучения постэруптивных аркад на Солнце в спектральных полосах 171, 195, 284 и 304 Å по данным спутника STEREO и их микроволнового излучения на радиотелескопе РАТАН-600. Для определения дифференциальной меры эмиссии использован оригинальный вероятностный подход, развитый ранее А.М. Урновым, в котором при решении обратной задачи не требуется регуляризации, а получаемые результаты не зависят от выбранной сетки температур. Это позволило определить дифференциальную меру эмиссии в области температур примерно от 0.3 до 15 МК. Последующий расчет теплового магнитотормозного излучения в многотемпературной модели с убывающим с высотой магнитным полем дает спектр, аналогичный наблюдаемому на РАТАН-600. Тем самым показано, что во многих нестационарных событиях не слишком большой мощности тепловая многотемпературная модель вполне применима для объяснения излучения постэруптивных арочных систем, и нет необходимости привлекать излучение ускоренных частиц. Предлагаемая модель позволяет непосредственно оценить соотношение между магнитным и газовым давлениями в вершинах постэруптивных аркад и определить условия возникновения вторичных нестационарных процессов на фазе затухания основной вспышки.

1. ВВЕДЕНИЕ

Отличительной чертой вспышек является формирование и последующая эволюция петель, заполненных горячей плазмой. Как правило, первые петли появляются на изображениях в рентгеновских лучах или в линиях вакуумного ультрафиолета (ВУФ) вблизи источника импульсного энерговыделения, и затем система петель быстро распространяется вдоль нейтральной линии магнитного поля. В сколько-нибудь мощных процессах — С-, М- и Х-вспышках — часто развиваются последовательно несколько групп петель, объединяющихся в одну крупномасштабную систему на завершающейся стадии всего явления.

Как известно, постэруптивные (ПЭ) аркады ранее наблюдались в хромосферных линиях, наиболее часто — в линии H α . Они появлялись после максимума вспышки, и их высота постепенно увеличивалась, достигая примерно 30 000 км. В очень редких случаях наблюдался уход ПЭ-аркады в межпланетное пространство (так называемые динамические вспышки по Швестке). Время жизни аркад находится в пределах от нескольких часов до нескольких суток. В прошедшем цикле активности аркады регулярно наблюдались на спутнике SOHO в нескольких диапазонах ВУФ, лучше всего — в области 195 Å. Наблюдения SOHO перекрывали диапазон температур от 0.1 МК до 3 МК. Важным фактом оказалось обнаружение на спутнике КОРОНАС-Ф долгоживущих образований в

*E-mail: maliv@mail.ru

линии иона $\text{MgXII } 8.42 \text{ \AA}$ [1], свидетельствующих о наличии больших плазменных образований с более высокими температурами 6–15 МК. Эти источники, из-за своей формы получившие название “пауков”, либо совпадают с ПЭ-аркадами, либо непосредственно примыкают к их вершинам.

Физически длительное существование горячей плазмы на стадии затухания вспышек связано с ее длительным нагревом, компенсирующим небольшие радиационные потери энергии. Доказательства продолжительного высвобождения энергии после импульсной фазы были получены, например, по данным радиогелиографов Нобейма (17 ГГц) и ССРТ (5.7 ГГц) для мощной лимбовой вспышки 2 ноября 1992 г. [2]. Из многочисленных работ недавнего времени отметим работу [3], в которой было начато изучение холодной и горячей ПЭ-аркады по ее излучению в мягком и жестком рентгеновском диапазоне. Отметим также, что оценка времени охлаждения плазмы ПЭ-петель от температур около $4 \times 10^6 \text{ К}$ до 10^4 К была выполнена в [4].

Вспышка 2 ноября 1992 г. рассматривалась также в [5] по одновременным наблюдениям в мягком рентгеновском диапазоне и в линии $\text{H}\alpha$. В этой работе было высказано предположение, что газовое давление приближается к магнитному вблизи вершин петель. Такой вывод по данным КОРОНАС-Ф был получен в работе Гречнева и др. [6]. В этой же работе приведена основная литература по определению физических условий в ПЭ-аркадах.

Физические условия в плазме внутри самих аркад, особенно в начале их существования, зависят от процессов в начале вспышки. Основным фактором здесь является эффективность ускорения частиц и степень их удержания в магнитосфере активной области. Потоки ускоренных частиц, вторгаясь вблизи оснований петель в плотные слои атмосферы, приводят к процессу взрывного испарения, и горячая плазма заполняет корональные петли. Влияние ускоренных частиц на состояние плазмы в арках уменьшается со временем, если конечно не происходит повторных актов импульсного энерговыделения. До сих пор считалось, что ускоренные частицы вносят значительный вклад в микроволновое и рентгеновское излучение ПЭ-аркад, особенно в начальной стадии их жизни.

Данные РАТАН-600 начали привлекаться еще с 80-х гг. для интерпретации длительных событий — например, вспышки 22 сентября 1980 г. [7]. Всего по микроволновым данным с той или иной степенью детальности изучены около 10 случаев регистрации излучения ПЭ-аркад, развивающихся как на лимбе, так и в проекции на диск. Практически во всех случаях встречалась одна и та же

трудность, неподдающаяся логичной интерпретации. Наиболее подробно такая ситуация описана в статье [8], посвященной ПЭ-аркаде, развившейся после залимбовой вспышки 25 января 2007 г. В этой работе приводятся наблюдения, полученные на РАТАН-600 всего через полчаса после максимума С6.3-вспышки. Эволюция спектра источника микроволнового излучения оказалась весьма необычной: вначале спектр был плоским в диапазоне 1.8–5 см, а затем поток заметно спадал в сторону коротких волн. Плоский спектр в микроволновом диапазоне обычно связывается с тепловым излучением оптически тонкого изотермического источника. Поэтому наблюдения на РАТАН-600 означали, что при формировании арок должно существовать большое количество горячей плазмы. С другой стороны, по мере затухания явления спектр становился падающим в сторону коротких длин волн, что характерно для магнитотормозного излучения ускоренных частиц. Это противоречило наблюдениям в метровом диапазоне (ИЗМИРАН, эксперимент WIND/Wave), свидетельствовавшим об отсутствии указаний на наличие в это же время каких-либо нетепловых эффектов.

Для возможного решения возникшего противоречия на примере события 25 января 2007 г. мы использовали появившиеся наблюдения КА STEREO. Мы определили количество плазмы, обладающей различными температурами, и вновь вычислили спектр теплового магнитотормозного излучения. В данной статье в Заключение суммируются результаты работы и обсуждаются некоторые проблемы физики ПЭ-аркад.

2. НАБЛЮДЕНИЯ НА РАТАН-600

Регулярные многоволновые наблюдения Солнца на РАТАН-600 [9] проводятся с ноября 1974 г. В большинстве случаев это были наблюдения в меридиане, при прохождении Солнца через неподвижную диаграмму направленности телескопа. В последнее время для этих наблюдений используется антенная система, состоящая из Южного сектора антенны и плоского перископического зеркала (Ю+П). Это позволяет получать от нескольких до 61 одномерного разреза в день. С достаточной точностью определяются наблюдательные характеристики исследуемых источников радиоизлучения: положение на диске Солнца и за его пределами, поток излучения, угловой размер, процент круговой поляризации. Тщательно проводится выделение источника над уровнем излучения спокойного Солнца в центральной части солнечного диска и около лимба, учет и исключение паразитных сигналов в канале поляризации. Размер диаграммы

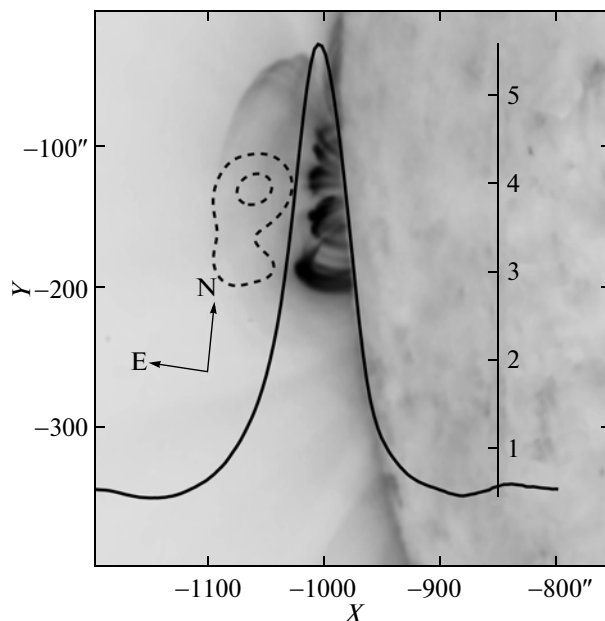


Рис. 1. Положение рентгеновского источника 6–12 кэВ (RHESSI; изолинии на уровне 90% и 60% от максимума) и скан источника на частоте 10.33 ГГц (ПАТАН-600) относительно аркады, наблюдавшейся в 195 Å (SOHO). Все наблюдения выполнены в 08:18 UT. Координаты отсчитываются от центра Солнца. Шкала ординат, показанная в правой части графика, соответствует превышению яркостной температуры источника над уровнем спокойного Солнца в единицах 10^4 К.

направленности антенной системы Ю+П по уровню половинной мощности составляет $17'' \times 13'$ на частоте 15 ГГц.

В ходе наблюдений Солнца в диапазоне 6–16 ГГц на ПАТАН-600 в 7 азимутах с интервалом 35 мин было зарегистрировано микроволновое излучение развивающейся ПЭ-аркады в активном событии на восточном лимбе 25 января 2007 г., которое состояло из широкомасштабного коронального выброса массы (СМЕ) и связанной с ним вспышки С6.3 за восточным лимбом. Вспышка началась в 06:33 UT, причем основания корональных петель располагались за лимбом. В течение 3.5 ч над восточным лимбом наблюдался радиоисточник (рис. 1), максимум излучения которого проектировался на вершину формирующейся аркады, наблюдаемой в диапазоне 195 Å на SOHO/EIT и на STEREO. Примерно в том же месте располагался корональный источник рентгеновского излучения при энергиях более 12 кэВ (RHESSI).

Максимум интенсивности микроволнового излучения проектируется на вершины аркад. Примерно до 9 ч аркада развивалась на юге, но затем начала появляться и ее северная часть. По наблюдениям на ПАТАН-600 микроволновое излучение северной (новой) петлевой системы стало хорошо заметно с 09:26 UT как второй максимум в микроволновых сканах источника над лимбом [8, рис. 2h],

и к концу наблюдений оно оказалось сильнее системы первой образовавшейся арочной системы. В то же время радиоизлучение старой петлевой системы было сильнее поляризовано (степень круговой поляризации около 12%), чем новой системы.

Приведем интегральные характеристики микроволнового источника над лимбом, связанного со всей ПЭ-аркадой, и их эволюцию в процессе формирования аркады. Эффективный размер D излучающей области вдоль направления сканирования определялся как $D = (A^2 - B^2)^{1/2}$, где A и B — соответственно размер источника на половине высоты скана и ширина диаграммы направленности ПАТАН-600 (по уровню половинной мощности). Предполагалось, что одномерное распределение яркости по всему реальному источнику и диаграмма направленности имеют форму, близкую к функции Гаусса. Эффективные размеры радиоисточника на всех волнах в рабочем диапазоне 6–16 ГГц оказались практически одинаковыми. В первом наблюдении эффективный размер излучающей области на микроволнах больше, чем маленькая петля в линии 195 Å (SOHO/EIT) на солнечном лимбе. В поздних наблюдениях размеры изображения в микроволновом диапазоне примерно такие же, что и проекции всей петлевой системы на направление сканирования. Величина D примерно равна 1 угловой минуте, и она несколько возрастает в течение 3 ч наблюдений.

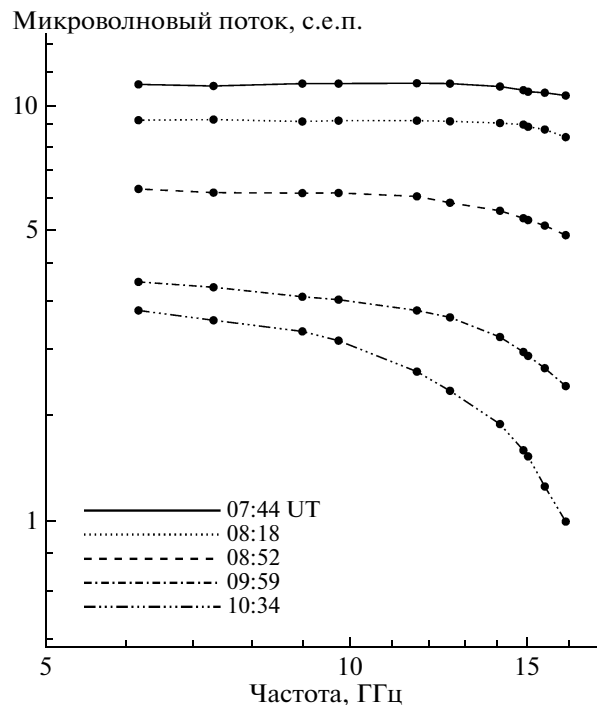


Рис. 2. Эволюция микроволнового спектра в событии 25 января 2007 г. (РАТАН-600).

Интенсивность микроволнового излучения была высокой непосредственно после максимума вспышки в начале образования ПЭ-аркады, затем она заметно уменьшилась. Характер спектра полного потока излучения аркады менялся со временем. Эволюция спектров полного потока радиоисточника над лимбом, связанного с пост-эруптивной аркадой, показана на рис. 2. Спектры построены как верхние огибающие спектров с использованием всех волн рабочего диапазона. Ошибка в измерении потоков (10–15%) определялась как точностью выделения источника, так и методом калибровки. Для абсолютной калибровки использовались данные наблюдений Луны и Крабовидной туманности на РАТАН-600. Также учитывались интегральные потоки Солнца, полученные Сетью солнечных радиотелескопов (Radio Solar Telescope Net — RSTN). Для данного события были использованы наблюдения станции Learmonth (Австралия). Все измеренные потоки выражены в солнечных единицах потока (1 с.е.п. = 10^{-22} Вт см $^{-2}$ Гц $^{-1}$).

Спектр полного потока микроволнового источника на ранней стадии формирования ПЭ-аркады практически плоский. Это позволяет сделать вывод, что тепловое излучение преобладает непосредственно после максимума вспышки.

Рассматривая тепловой тормозной механизм излучения оптически тонкой горячей плазмы как

преобладающий механизм микроволнового излучения на ранних стадиях формирования аркады, можно оценить меру эмиссии ЕМ, используя хорошо известное выражение:

$$S [\text{с.е.п.}] \sim 3 \times 10^{-45} \text{ЕМ} [\text{см}^{-3}] (T [\text{К}])^{-1/2},$$

где S — полный поток радиоизлучения и T — температура излучающей плазмы.

Используя поток S на самой высокой частоте (16.7 ГГц) и предполагая, что яркостная температура T_b на самой низкой частоте (6 ГГц) является нижним пределом кинетической температуры плазмы в аркаде (оптическая толщина $\tau(6 \text{ ГГц}) \gg \tau(16.7 \text{ ГГц})$), получаем, что $T_b = 5.2$ МК, $\text{ЕМ} = 14.6 \times 10^{48} \text{ см}^{-3}$ в 07:44 UT и $T_b = 2.4$ МК, $\text{ЕМ} = 7.5 \times 10^{48} \text{ см}^{-3}$ в 08:18 UT.

Считая, что объем излучающей области $V = D^3$, где D — эффективный размер радиоисточника, мы получили среднюю электронную плотность $2.2 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ и $1.0 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$, соответственно. Отметим, что спектры микроволнового излучения ПЭ-аркады, полученные через 3 ч после максимума вспышки в событии 25 января 2007 г., практически совпадают со спектрами, полученными на РАТАН-600 для ПЭ-аркады на поздней стадии эруптивного события 22 октября 2001 г., через 6–8 ч после максимума вспышки класса М [1, 6]. Разумеется, мера эмиссии и плотность в 07:44 UT может быть завышенной (плотность — до 2 раз)

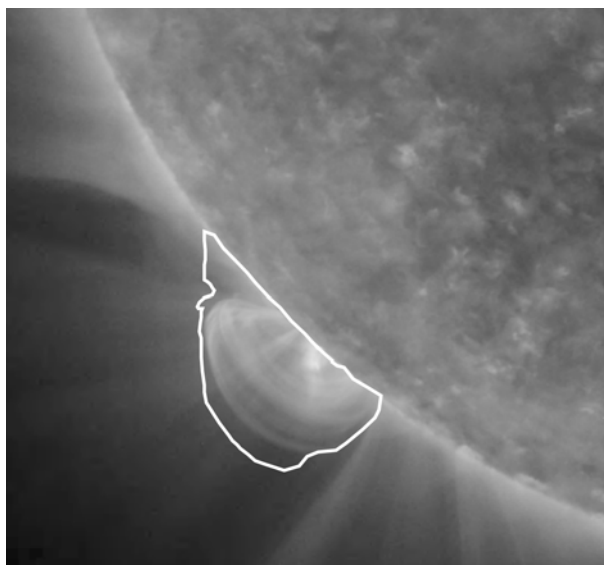


Рис. 3. Изображение STEREO в диапазоне $171 \text{ \AA}$ (07:40 UT). Контур ограничивает область, от которой измерялись потоки излучения. Представлено оригинальное изображение STEREO-B, ориентация которого отличается от стандартной. Размер кадра — $650'' \times 650''$.

вследствие того, что не весь поток излучения при образовании аркады имеет тепловую природу.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ НА STEREO

В дополнение к данным SOHO, мы рассмотрели событие 25 января 2007 г. по наблюдениям одного из коронографов спутника STEREO-B. Это позволило провести анализ при большей частоте получения изображений, с лучшим знанием полос ВУФ и более надежной калибровкой данных.

Два одинаковых космических аппарата были запущены 26.10.2006 для реализации программы Solar TErrestrial RElations Observatory (STEREO). В состав аппаратуры каждого из аппаратов входило 4 набора инструментов для изучения внешней атмосферы Солнца и межпланетного пространства до орбиты Земли. Ниже будут использованы данные прибора EUVI (Extreme UltraViolet Imager), входящего в набор инструментов SECCHI (Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation). Его конструкция аналогична EIT (SOHO), с дополнительной компенсацией (как у TRACE) смещения изображения до $7''$. Радиус поля зрения был 1.7 солнечных радиуса, размер пикселя — $1.6''$. Изображения Солнца регистрируются в 4 полосах ВУФ: $171 \text{ \AA}$ (FeIX, FeX), $195 \text{ \AA}$ (FeXII, FeXXIV), $284 \text{ \AA}$ (FeXV) и $304 \text{ \AA}$ (HeII). Длительность экспозиций составляла от 2 до 32 с с интервалами получения изображений от 2.5 до 32 мин. Более подробные сведения содержатся в [10].

Для данного события использовались наблюдения, полученные на одном из аппаратов STEREO Behind (событие N17 в каталоге вспышек и CME [11]). Различие углов зрения двух аппаратов (Ahead, Behind) в тот год составляло всего 0.5° . Поэтому можно было считать, что явление наблюдается с того же направления, что и при наблюдении с Земли.

На изображении всего Солнца в каждой из 4 полос была выделена площадка (рис. 3, контур). Сама площадка ограничивала аркаду в полосах ВУФ во все моменты ее наблюдений на RATAN-600. Ее площадь составляла $1.4 \times 10^{20} \text{ см}^2$. Важно отметить, что вся выбранная площадка располагалась выше края Солнца. В противном случае различие яркостей диска и корональных слоев над ним, особенно в линии $304 \text{ \AA}$, серьезно затрудняет анализ. Потоки излучения EUVI-коронографа В, за вычетом фона, суммировались по всем пикселям выбранной площадки. Изменение потоков излучения в диапазоне $195 \text{ \AA}$, в котором наблюдения проводились наиболее часто, приводится на рис. 4. Здесь же приведены регистрации GOES и указаны моменты проведения сканирования на RATAN-600. Заметим также, что максимум рентгеновского излучения около 7 UT в диапазонах как спутника GOES, так и RHESSI с энергиями от 3 до 50 кэВ [8, рис. 6а] никак не проявился в диапазонах ВУФ (STEREO). В событии 25 января 2007 г. основания петель располагались за лимбом, а излучение коронального источника: ускоренных частиц и высокотемпературной плазмы в нем практически не проявилось в областях излучения ВУФ.

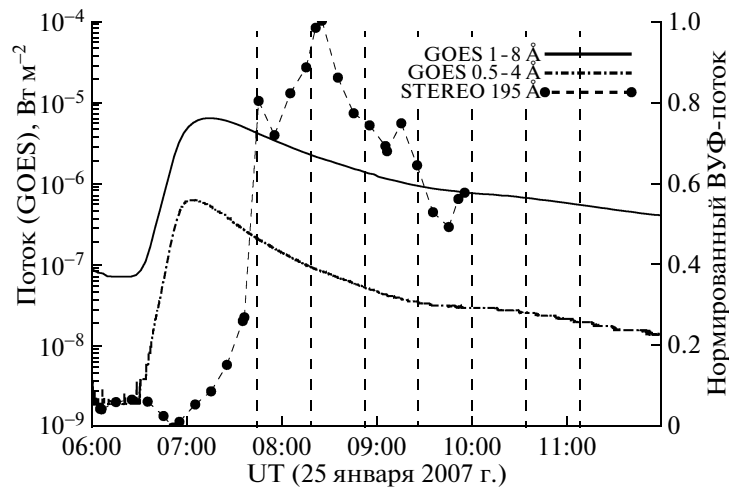


Рис. 4. Временные профили полного потока Солнца в мягком рентгеновском и ВУФ-диапазонах. Вертикальные штриховые линии отмечают моменты наблюдений на РАТАН-600.

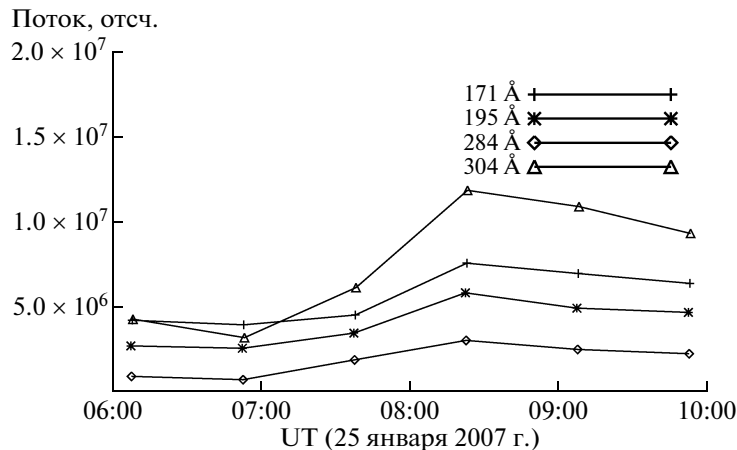


Рис. 5. Зависимость потоков от времени в 4 диапазонах ВУФ (EUVI/SECCHI) для области, показанной на рис. 3.

Первое наблюдение на РАТАН-600, проведенное примерно через 30 мин после максимума вспышки, совпало с самым началом регистрации излучения аркады в диапазонах ВУФ (см. также эволюцию излучения в диапазоне $171 \text{ \AA}$ в [11]).

Таким образом, наблюдения STEREO и РАТАН-600 отражают именно развитие ПЭ-аркады. Заметим, что основной максимум в диапазоне $195 \text{ \AA}$ около 8:30 UT на рис. 4 связан с появлением в поле зрения второй (северной) части аркады.

Нами были выбраны данные для общих моментов времени в интервале 6–10 UT и измерены потоки излучения во всех 4 диапазонах прибора EUVI (SECCHI). Изменение потоков (число фотонов, зарегистрированных от выбранной площадки) во времени показано на рис. 5. Эти данные будут

ниже использоваться как основа для построения многотемпературной модели источника.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МЕРЫ ЭМИССИИ (DEM)

Поток излучения в спектральном канале L , испускаемый в области длин волн $\Delta\lambda(L)$ из оптически тонкого плазменного источника объема V , дается выражением

$$I_L = \int_V G(L, T(\mathbf{r})) N_e^2(\mathbf{r}) d\mathbf{r}, \quad (1)$$

где $T(\mathbf{r})$ и $N_e(\mathbf{r})$ — пространственные распределения соответственно температуры и плотности электронов в объеме V , а $G(L, T)$ — функция температурного отклика в канале L , определяемая через спектральную функцию светимости

$\tilde{F}(\lambda; T, N_e)$, которая в свою очередь вычисляется в конкретной модели излучающей плазмы (включая условия коронального приближения и оптически тонкой плазмы) и интегрируется по области длин волн $\Delta\lambda(L)$ с аппаратной функцией спектрального прибора $f(L, \lambda)$ для канала L :

$$G(L, T) = \frac{1}{N_e^2} \int_{\Delta\lambda(L)} f(L, \lambda) \tilde{F}(\lambda; T, N_e) d\lambda. \quad (2)$$

Используя понятие дифференциальной меры эмиссии (DEM), характеризующей температурный состав излучающей плазмы, измеряемую величину I_L можно записать как интеграл по температуре

$$I_L = \int_{\Delta T} G(L, T) y(T) dT, \quad (3)$$

где $y(T)$ — функция распределения для DEM по температуре.

Задача нахождения распределения $y(T)$ формулируется как обратная задача спектроскопии и сводится к решению системы интегральных уравнений вида (3) для имеющегося набора спектральных каналов $\{L_i\}$ (i — номер канала). Для восстановления температурного профиля DEM по каналам STEREO мы использовали итерационный метод Байеса (ИМБ), разработанный в рамках вероятностного подхода к решению обратной задачи и полученный на основе теоремы Байеса [12, 13]. В вероятностном подходе, который мы используем для математической формализации обратной задачи спектроскопии, формула (3) заменяется формулой полной вероятности

$$P(L) = \int_{\Delta T} P(L|T) P(T) dT \quad (4)$$

для вероятностных распределений $P(L)$, $P(L|T)$ и $P(T)$, которые положительно определены и удовлетворяют условиям нормировки

$$\sum_L P(L) = 1, \quad \sum_L P(L|T) = 1, \quad (5)$$

$$\int_{\Delta T} P(T) dT = 1,$$

где суммирование и интегрирование выполняются по всем спектральным каналам и в заданном интервале температур, соответственно. Эти распределения интерпретируются как плотности вероятности случайных величин L и T , определенных на соответствующих множествах полных систем событий: $P(T)$ — плотность вероятности для фотона быть испущенным плазмой при температуре T , $P(L)$ —

вероятность излученному фотону быть зарегистрированным в канале L , а $P(L|T)$ — условная вероятность события L при условии T .

Для нахождения неизвестной функции $P(T)$ мы применяли итерационную схему ИМБ [12]:

$$P^{(n+1)}(T) = P^{(n)}(T) \sum_L \frac{P^{\text{exp}}(L)}{P^{(n)}(L)} P(L|T), \quad (6)$$

где $P^{\text{exp}}(L) = I_L^{\text{exp}} / \sum_{L'} I_{L'}^{\text{exp}}$ — наблюдаемое распределение вероятности в каналах $\{L_i\}$, а величины $P^{(n)}(L)$ вычисляются с помощью (4) с n -м приближением $P^{(n)}(T)$. В формуле (6) левая сторона $P^{(n+1)}(L)$ интерпретируется как оценка для n -ой гипотезы распределения $P(T)$, а величины $P^{\text{exp}}(L)/P^{(n)}(L)$ и критерий χ^2 используются для оценки согласия между рассчитанными и наблюдаемыми потоками и контроля сходимости итерационной процедуры. В качестве нулевого приближения $P^{(0)}(T)$ использовалось равновероятное распределение. По найденному решению $P(T)$ вычисляется распределение $y(T)$ для DEM:

$$y(T) = \frac{P(T) \sum_L I_L^{\text{exp}}}{\sum_L G(L, T)}. \quad (7)$$

В расчетах DEM использовались температурные отклики $G(L, T)$ для каналов STEREO, рассчитанные с помощью пакета CHIANTI и взятые из соответствующего солнечного программного обеспечения (solarsoft for SOHO/STEREO). Эти функции показаны на рис. 6, на котором можно видеть температурные области формирования излучения для соответствующих спектральных каналов. Результаты расчетов температурных профилей DEM как функции логарифма температуры (в кельвинах) с данными STEREO для областей с ПЭ аркадами приведены на рис. 7.

Полученные распределения $y(T)$ для DEM можно сопоставить с данными, определяемыми по рентгеновским наблюдениям. Рентгеновские спектры для моментов времени, близких к сканам на RATAN-600, были построены по данным RHESI. Два спектра были приведены ранее [8, рис. 6а]. Анализ этих спектров показывает, что тепловая часть излучения в диапазоне 1–10 кэВ медленно уменьшается после 8:18 UT, и это связано с небольшим изменением температуры $T \sim 13.3$ МК и значительным падением меры эмиссии (ЕМ). В выбранной нами модели $ЕМ = 1.3 \times 10^{48} \text{ см}^{-3}$. Приведенная величина ЕМ лишь несколько меньше той, которая следует из проведенного выше анализа ВУФ-наблюдений в высокотемпературной области. Там изменения DEM, проинтегрированные по всем областям с $T = 5\text{--}8$ МК, в несколько

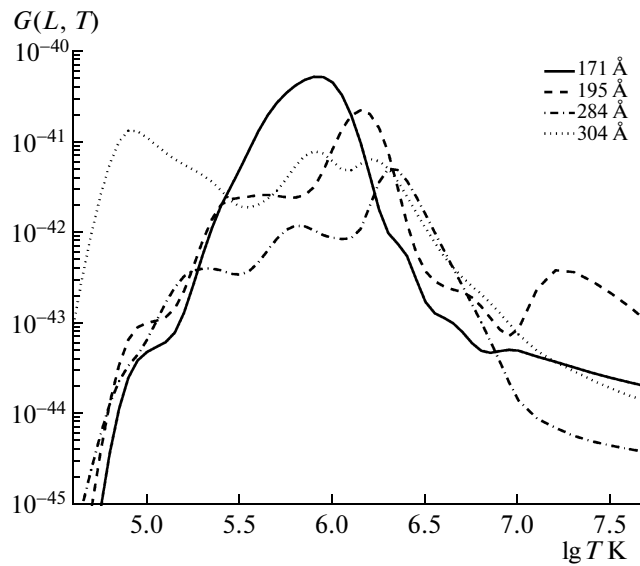


Рис. 6. Функции вклада для каналов прибора EUVI спутника STEREO.

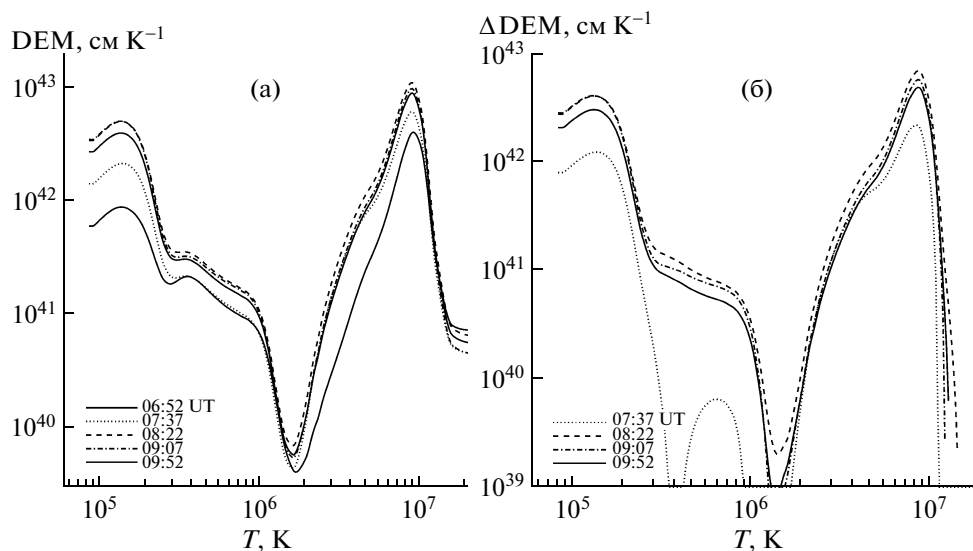


Рис. 7. (а) — Распределение $DEM(T)$ для различных моментов времени. (б) — Разность $\Delta DEM(T, t) = DEM(T, t) - DEM(T, t_0)$ для указанных моментов времени и начального момента 06:52 UT (на рис. 7а — кривая для этого начального момента является самой нижней).

раз превышают величину, найденную по спектру мягкого рентгеновского излучения. Учитывая некоторое различие температур, согласие этих выводов можно считать хорошим.

Окончательно можно принять для ПЭ-аркады в целом $EM = 4 \times 10^{48} \text{ см}^{-3}$. Различные простые оценки, учитывающие небольшое гидростатическое падение плотности с высотой, приводят к средней плотности в петлях, близкой к $0.5 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$, или с учетом “скважности” — к величинам в пределах $(0.5-1) \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Это значение

совпало с приведенным Гречневым и др. [6], что отражает тот факт, что плотность при сравнимой энергетике всего нестационарного процесса мало изменяется как в различных ПЭ-аркадах, так и в ходе конкретного такого события.

5. МИКРОВОЛНОВЫЕ СПЕКТРЫ РАТАН-600 И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

В процессе выполнения этой работы возникло предположение, что необычность спектров РАТАН-600, особенно после исчезновения явных

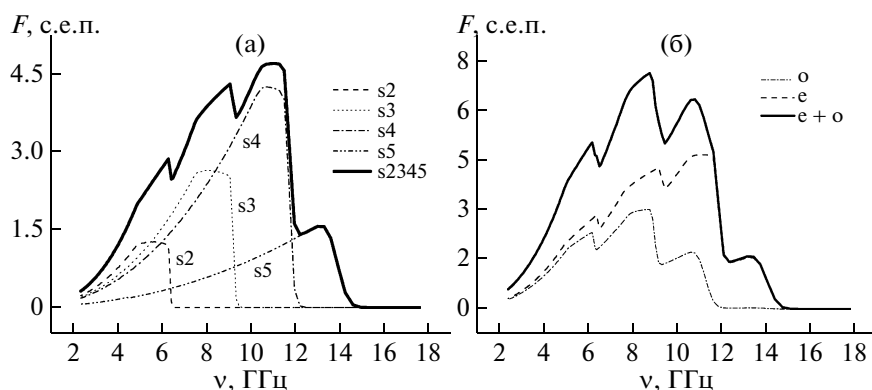


Рис. 8. (а) — Магнитотормозное излучение столба горячей плазмы. Приведены гармоники 2–5 необыкновенной волны и их сумма. (б) — Излучение холодного и горячего столбов плазмы в обычном (нижняя кривая) и необыкновенном (средняя кривая) излучении. Верхняя кривая — суммарное излучение.

нетепловых явлений, связана не с влиянием ускоренных частиц, а с необходимостью учета областей с различными температурами. Соответствующие данные получены выше, и величина $DEM(T)$, относящаяся к ПЭ-аркаде (рис. 7б), может использоваться для построения моделей источника. Существенной трудностью является привязка к высотам областей плазмы с различными температурами, что не может быть сделано без использования дополнительных наблюдений или допущений. Вычисление магнитотормозного излучения системы петель, в полной мере учитывающее результаты определения $DEM(T)$, является задачей будущего. Ниже предлагается одна из простых моделей, иллюстрирующих влияние “многотемпературности” источника излучения.

Как известно, магнитотормозное излучение с конца 60-х гг. успешно применялось для интерпретации данных о микроволновом излучении источников над солнечными пятнами [14–17]. Важным фактором здесь являлось то, что над тенью пятна переход от холодных к горячим (корональным) слоям происходит одновременно с уменьшением напряженности магнитного поля от тысяч до десятков эрстед. В отличие от вертикальной трубки, для петель в активных областях недавно была разработана модель, в которой рассчитывается тепловое магнитотормозное излучение горячей петли в виде тора с постоянной напряженностью магнитного поля на его оси. Особенность модели заключается в необычности поверхности гирорезонансных уровней [18, 19] (с более детальным учетом хромосферных слоев — в [20]). Существование в активной короне очень длинных петель, соединяющих точки с противоположной полярностью поля, оправдывает предположение о постоянстве поля внутри них. ПЭ-аркада располагается непосредственно над нейтральной линией (продольного) магнитного поля, и расстояние между

основаниями петель существенно не превышает их высоту, достигающую 30 000 км. Напряженности магнитного поля в основаниях некоторых арок, располагающихся вблизи пятен, могут достигать значений около 1000 Э. В вершинах этих арок поля на 1–2 порядка слабее. Поэтому микроволновое излучение будет преимущественно возникать вблизи оснований петель. Заметим, однако, что темп уменьшения поля с высотой в нижней части арок может быть ниже, чем над тенью пятен.

На рис. 8 для примера приводится расчет магнитотормозного излучения двух больших вертикальных трубок, видимых под углом 45° к оси. Исходя из анализа $DEM(T)$, полагаем, что температура в первой из них составляет $T = 4$ МК, во второй — $T = 8$ МК. Существованием газа с температурами около 0.1 МК здесь пренебрегается, так как эти области вносят пренебрежимо малый вклад в тепловое магнитотормозное излучение аркады. Принимается, что распределение плотности с высотой в холодной и горячей “петле” подчиняется гидростатическому закону с плотностью в их основаниях $n_0 = 5 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ и со шкалами высот $1.4 \times 10^{10} \text{ см}$ и $2.8 \times 10^{10} \text{ см}$, соответственно (заметим, что при выборе этих зависимостей учитывались результаты, полученные по мягкому рентгеновскому диапазону). Радиус петель взят равным 5 тыс. км. Здесь приводятся результаты расчетов для вертикального магнитного поля $H(h) = H_0(1 - h/h_0)$ с $H_0 = 1000$ Э и $h_0 = 70$ тыс. км, хотя расчеты были выполнены и для $H_0 = 700$ Э и $H_0 = 2000$ Э. Заметим также, что столбы плазмы не экранируют друг друга, и окружающая плазма отсутствует.

В результате расчетов получено, что в диапазоне 2–15 см (15 – 2 ГГц — рис. 8а) излучение приходит с плоских гироуровней гармоник 2–5 (для пятен типичными являются гармоники 2 и 3). Так излучение 2-ой гармоники проявляется на волнах 4–13 см с максимумом на 6 см. Излучение на 3-ей

гармонике на волне 6 см лишь несколько уступает излучению на 2-ой гармонике, а максимума оно достигает на волне 4 см. На волне 3 см максимален вклад излучения 4-ой гармоник, а на волне 2.1 см — 5-ой.

Сумма излучения гармоник 2–5 гирочастоты показана на рис. 8б. Во-первых, оценки показывают, что потоки излучения превышают тепловое излучение соответствующих источников в отсутствие магнитного поля. Это свидетельствует о заметной эффективности магнитотормозного излучения. Во-вторых, избыток излучения появляется в необходимом диапазоне 6–16 ГГц с весьма близким спектром. Резкий “завал” спектра поляризованного излучения в области высоких частот связан, конечно, с принимаемой моделью магнитного поля. Как известно, по этой особенности определялась напряженность магнитного поля в методе, предложенном Г.Б.Гельфрейхом (изложение метода дано в работе [21]). Для системы из многих петель такое уменьшение потоков в сторону высоких частот будет выражено не так резко.

В рамках обсуждаемой самой простой модели двух вертикальных столбов появляется трудность — степень поляризации оказывается выше наблюдаемых значений. Однако этого следовало ожидать. Реальная система включает более 10 петель, с несколько различающимися физическими условиями и углами наклона к наблюдателю. Эти факторы безусловно будут приводить к заметному уменьшению степени поляризации.

Предварительные расчеты, учитывающие суммарное тепловое излучение всей области, занимаемой петлями (излучение петель с полем и окружения, лишенного заметного поля), показывают, что удастся получить спектр микроволнового излучения ПЭ-аркад, аналогичный регистрируемому на РАТАН-600. Эта модель использует уже всю информацию о распределении $DEM(T)$ и более реальную форму петель. Однако основной трудностью является неопределенность в выборе распределения магнитного поля в петле на различных высотах.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мощные нестационарные процессы на Солнце включают в себя СМЕ и формирование петель, заполненных плотной горячей плазмой. ПЭ-аркада является чаще всего результатом эволюции самих вспышечных петель, хотя иногда она появляется вдоль нейтральной линии магнитного поля на большом удалении от очага самой вспышки. Численное моделирование и аналитические методы рассмотрения процессов внутри арок приводят к одному и тому же результату: достаточно очень небольшого нагрева плазмы, например, в верхней части петель,

чтобы аркада существовала все время, пока действует этот источник энергии. Он необходим для того, чтобы компенсировать радиационные потери, которые при температуре плазмы около 5 МК минимальны. К сожалению, до сих пор остается много вопросов о причинах формирования ПЭ-аркад, фиксации их высот, заполнении петель веществом и др., частично связанных с деталями развивающегося МГД-процесса. Эти проблемы еще далеки от своего решения.

Современные наблюдения дают мощный импульс изучению физики постэруптивных аркад. Так, например, сейчас удастся достаточно точно определять температуру и плотность в вершинах арок. В рамках некоторых предположений о напряженности магнитного поля в короне Гречневым и др. [6] сделан вывод о примерном равенстве газового и магнитного давления в вершинах петель. Когда магнитное “бэа” приближается к единице, газодинамические эффекты начинают доминировать. Это может определять как высоту, до которой поднимаются петли, так и условия выброса плазмы в межпланетное пространство на стадии затухания нестационарных процессов на Солнце.

Многолетние наблюдения ПЭ-аркад на РАТАН-600 выявили весьма необычное поведение микроволнового спектра — непосредственно после формирования аркады спектр был плоским в области частот 6–16 ГГц, а затем со временем спадал в сторону высоких частот. Кроме этого, интенсивность излучения, например, на частотах около 6 ГГц (5 см) уменьшалась уже после формирования аркады, что свидетельствовало об ослаблении меры эмиссии основного источника теплового излучения плазмы. Однако при этом наклонная форма спектра, как считалось ранее, свидетельствовала о магнитотормозном излучении ускоренных частиц.

Использование данных STEREO и их современный анализ позволили нам разрешить противоречие между предполагавшимся тепловым механизмом излучения изотермического источника и формой спектра, характерной для магнитотормозного излучения ускоренных частиц. Для выделенной на изображении площадки — области излучения ПЭ-аркады — найдены потоки в четырех диапазонах ВУФ и определена зависимость количества плазмы с различной температурой. Эти величины сопоставлены с данными о мягком рентгеновском излучении, зарегистрированном на RHESSI. Соответствующая информация о многотемпературном источнике использована для расчета теплового микроволнового излучения. В нашей работе для иллюстрации приводится самый простой случай, предполагающий, что магнитное поле меняется с высотой линейно. Даже такая модель в рамках многотемпературного анализа естественно дает

форму микроволнового спектра, подобную наблюдаемой на РАТАН-600. Более детальная модель будет опубликована в дальнейшем.

Таким образом, мы подтверждаем, что основным эффектом на стадии затухания вспышки является образование большого количества горячей плазмы, существующего затем на протяжении многих часов. Вклад ускоренных частиц в излучение рассмотренных диапазонов пренебрежимо мал для событий умеренной и малой мощности. Только в самых мощных событиях, особенно непосредственно после формирования аркады, этот вклад может становиться заметным.

Однако в разрабатываемой нами модели необходимо наличие магнитного поля напряженностью около 1000 Гс в основании трубок на уровне фотосферы. До сих пор прямые измерения не дают таких значений поля в небольших элементах активной области, доступных современным наблюдениям.

Авторы благодарны коллективам STEREO и РАТАН-600, а также GOES и SOHO за предоставленную возможность работать с полученными ими данными. Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований 11-02-00264 и программой фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН ОФН-15 “Плазменные процессы в Солнечной системе”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. М. Гречнев, С. В. Кузин, А. М. Урнов и др., *Астрон. вестн.* **40**, 314 (2006).
2. А. Т. Altyntzev, V. V. Grechnev, H. Nakajima, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **113**, 415 (1999).
3. L. K. Harra-Murnion, B. Schmieder, L. van Driel-Gesztelyi, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **337**, 911 (1998).
4. S. Kamio, H. Kurokawa, and T. Ishi, *Solar Phys.* **215**, 127 (2003).
5. K. Ichimoto, T. Sakurai, and Flare Telescope and Norikura Team, in: *Proc. 2nd Japan—China Seminar on Solar Physics*, eds T. Sakurai, T. Hirayama, G. Ai (Tokyo: NAO, 1994), p. 151.
6. V. V. Grechnev, A. M. Uralov, I. A. Zandanov, *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan* **58**, 55 (2006).
7. V. N. Borovik, G. B. Gelfreikh, V. M. Bogod, *et al.*, *Solar Phys.* **124**, 157 (1989).
8. I. Yu. Grigorieva, V. N. Borovik, M. A. Livshits, *et al.*, *Sol. Phys.* **260**, 157 (2009).
9. В. М. Богод, А. М. Алесин, А. А. Перваков, *Астрофиз. бюлл.* **66** (2011, в печати).
10. M. J. Aschwanden, L. F. Burlaga, M. L. Kaiser, *et al.*, *Space Sci. Revs* **136**, 67 (2008).
11. M. J. Aschwanden, J. P. Wuesler, and N. V. Nitta, *Solar Phys.* **256**, 3 (2009).
12. А. М. Урнов, С. В. Шестов, С. А. Богачев и др., *Письма в “Астрон. журн.”* **33**, 446 (2007).
13. F. F. Goryaev, S. Parenti, A. M. Urnov, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **523**, A44 (2010).
14. В. В. Железняков, *Астрон. журн.* **40**, 829 (1963).
15. Е. Я. Злотник, *Астрон. журн.* **45**, 310 (1968).
16. Е. Я. Злотник, *Астрон. журн.* **45**, 585 (1968).
17. М. А. Лившиц, В. Н. Обридко, С. Б. Пикельнер, *Астрон. журн.* **43**, 1135 (1966).
18. Е. Я. Злотник, Т. И. Кальтман, О. А. Шейнер, *Письма в Астрон. журн.* **33**, 196 (2007).
19. Е. Я. Злотник, Т. И. Кальтман, О. А. Шейнер, *Письма в “Астрон. журн.”* **33**, 371 (2007).
20. Л. В. Яснот, Т. И. Кальтман, В. М. Богод, *Астрон. журн.* **88**, 86 (2011).
21. Sh. B. Akhmedov, G. B. Gelfreikh, V. M. Bogod, and A. N. Korzhavin, *Solar Phys.* **79**, 41 (1982).