

УДК 523.98

Ю. Т. Цап^{1, 2}, Л. И. Цветков¹, Ю. Ф. Юровский¹,
Н. Г. Петерова³, Т. П. Борисевич⁴, Б. В. Агалаков⁵

¹НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория»
98688 Крым, п. Кацивели

²НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория»
98409 Крым, п. Научный

³Санкт-Петербургский филиал Специальной астрономической обсерватории РАН,
196140 Санкт-Петербург, Пулковое, Россия

⁴Главная астрономическая обсерватория РАН
196140 Санкт-Петербург, Пулковое, Россия

⁵Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033 Иркутск, Россия

Нагрев верхней атмосферы Солнца и вариации микроволнового излучения активной области NOAA 0139

На основе радионаблюдений, проведенных на РАТАН-600, ССРТ и РТ-22, исследована эволюция и структура активной области NOAA 0139. С помощью методов вейвлет-анализа, а также изображений, полученных на космических орбитальных станциях SOHO и TRACE, показано, что наблюдаемая динамика микроволнового излучения S-компонента может быть вызвана изменением числа и мощности элементарных вспышечных событий. Обнаруженная в ходе эволюции активной области сильная депрессия излучения на коротких длинах волн объясняется уменьшением потоков ускоренных электронов, ответственных за высокую температуру переходной области и верхней хромосферы Солнца. Полученные результаты свидетельствуют о существенном вкладе в нагрев корональной плазмы элементарных вспышечных событий.

НАГРІВАННЯ ВЕРХНЬОЇ АТМОСФЕРИ СОНЦЯ І ВАРІАЦІЇ МІКРОХВИЛЬОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ АКТИВНОЇ ОБЛАСТІ NOAA 0139, Цап Ю. Т., Цветков Л. И., Юровський Ю. Ф., Петерова Н. Г., Борисевич Т. П., Агалаков Б. В. — На основі радіоспостережень, проведених на РАТАН-600, ССРТ і РТ-22, досліджено еволюцію і структуру активної області NOAA 0139. За допомогою методів вейвлет-аналізу, а також зображень, одержаних на космічних орбітальних станціях SOHO і TRACE, показано, що спостережувана динаміка мікрохвильового випромінювання S-компонента може бути викликана зміною кількості і потужності елементарних спалахових подій. Виявлена в ході еволюції активної області сильна депресія випромінювання на коротких довжинах хвиль

пояснюється зменшенням потоків прискорених електронів, відповідальних за високу температуру перехідної області і верхньої хромосфери Сонця. Одержані результати свідчать про істотний внесок в нагрів корональної плазми елементарних спалахових подій.

THE HEATING OF THE UPPER SOLAR ATMOSPHERE AND VARIATIONS OF MICROWAVE EMISSION FROM THE ACTIVE REGION NOAA 0139, by Tsap Yu. T., Tsvetkov L. I., Yurovskii Yu. F., Peterova N. G., Borisevich T. P., Agalakov B. V. — The evolution and structure of the active region NOAA 0139 on the basis of radio observations obtained at RATAN-600, SSRT, and RT-22 are investigated. By means of a wavelet analysis as well as images obtained at the space orbital stations SOHO and TRACE, it is shown that observed dynamics of the S-component of microwave emission may be caused by the change of number and power of elementary flare events. The strong depression of emission revealed at short wavelengths in the course of evolution of active region is explained by the decrease of fluxes of accelerated electrons, which are responsible for the high temperature of the transition region and upper chromosphere of the Sun. The results obtained show evidence for an essential contribution of elementary flare events to the heating of the coronal plasma.

ВВЕДЕНИЕ

К началу 1940-х гг. стало очевидным, что температура плазмы солнечной короны составляет миллионы градусов. Однако лишь в конце 1960-х гг. удалось получить рентгеновские изображения Солнца с достаточно высоким пространственным разрешением, благодаря которым удалось выяснить, что наиболее яркие корональные образования находятся над солнечными пятнами [36, 37]. Это легло в основу большого количества теоретических работ, посвященных механизмам нагрева плазмы в верхней атмосфере Солнца [20, 41]. Однако, несмотря на значительные достижения в данной области исследований, многие вопросы по-прежнему остаются открытыми.

В настоящее время считается, что за нагревание солнечной короны могут быть ответственны либо «переменные» (AC models), либо «постоянные» (DC models) электрические токи [20, 24, 41], обусловленные соответственно магнитогиродинамическими волнами и медленными фотосферными движениями. Данные модели имеют свои достоинства и недостатки. Так, альвеновские моды, распространяясь вдоль магнитных силовых линий, не сжимают плазму. Поэтому для объяснения эффективной трансформации их волновой энергии в тепловую прибегают, как правило, к механизмам фазового смешивания и резонансного поглощения [3, 6, 20, 32, 41]. В первом случае усиление затухания волн объясняется распространением соседних участках волнового фронта вдоль неоднородного магнитного поля с различными фазовыми скоростями, что приводит к увеличению градиентов возмущенных величин. Во втором случае сильное поглощение формально следует из наличия особенности в волновом уравнении. Однако само по себе фазовое смешивание не может обеспечить требуемую скорость диссипации, поэтому приходится прибегать к ряду дополнительных предположений [32]. Между тем физическая природа резонансного поглощения волн все еще остается до конца не выясненной [10].

Основной недостаток нагрева короны «постоянными» электрическими токами сводится к большим значениям проводимости плазмы в верхней атмосфере Солнца. Вследствие этого эффективная джоулева диссипация

может происходить либо в оболочках петель и тонких магнитных жгутах, либо в токовых слоях, возникающих в результате пересоединения магнитных силовых линий. Возможность существования в короне Солнца жгутов и оболочек с характерным поперечным сечением, не превышающим нескольких сотен, а то и десятков метров, в силу условий магнитогидродинамического равновесия и устойчивости представляется довольно проблематичной [8, 41]. Попытки обнаружить корреляцию между вертикальными токами в фотосфере и наиболее яркими рентгеновскими образованиями активных областей также оказались безуспешными [16]. В свете сказанного механизм энерговыделения, обусловленный пересоединением магнитных силовых линий, выглядит более привлекательным. Однако из-за малой толщины токовых слоев приходится предполагать, что в верхней атмосфере Солнца непрерывно формируется большое количество мелкомасштабных нестационарных образований, в которых непрерывно происходят слабые вспышечные процессы.

К настоящему времени получено много указаний, свидетельствующих в пользу данной гипотезы. Элементарные вспышечные события (ЭВС), которые в зависимости от их энергии E разделяют на микровспышечные (10^{20} — 10^{22} Дж) и нановспышечные (10^{17} — 10^{20} Дж), наблюдаются в радио- [31], ультрафиолетовом [9, 19, 21, 30] и рентгеновском [22, 31, 33] диапазоне. Вклад данных событий в нагрев плазмы верхней атмосферы Солнца определяется показателем спектра $\delta = -d \ln n(E) / d \ln E$, где $n(E)$ — спектральная частота вспышек [9, 18, 29]. ЭВС способны обеспечить требуемые корональные температуры, если показатель спектра $\delta > 2$ [18]. Имеющиеся оценки значений δ являются довольно противоречивыми [9, 18, 29, 31]. В связи с этим, по нашему мнению, чрезвычайно плодотворными могут оказаться исследования эволюции активных областей. Анализ непрерывных рядов наблюдений за достаточно большой промежуток времени позволяет сделать важные выводы о природе мелкомасштабной вспышечной активности. При этом роль радионаблюдений трудно переоценить, поскольку медленно изменяющийся компонент микроволнового излучения активных областей (S-компонента) существенно зависит как от конфигурации и напряженности магнитного поля, так и от температуры плазмы.

Представленная работа посвящена изучению структуры и эволюции активной области (АО) NOAA 0139 на основе микроволновых наблюдений, полученных на различных инструментах в первой половине октября 2002 г. Особое внимание уделяется поиску связи вариаций микроволнового излучения с изменениями фотосферных магнитных полей.

НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения проводились на крупнейших радиотелескопах России и Украины: РАТАН-600 (САО), ССРТ (ИСЗФ) и РТ-22 (НИИ КрАО). Разница в моментах кульминации Солнца на ССРТ и расположенных в Европе РТ-22 и РАТАН-600 составляет около 5 ч, что позволяло наблюдать одну и ту же активную область практически в одно время. Благодаря большому числу частотных каналов, задействованных на РАТАН-600, мы могли строить достаточно точные спектры излучения локального источника, а также детально изучать его поляризационные характеристики. Высокие угловые разрешения РАТАН-600 и ССРТ давали возможность получить подробные сканы и радиоизображения АО NOAA 0139. Телескоп РТ-22 привлекался для исследования тонкой временной структуры микроволнового излучения локального источника.

В октябре 2002 г. РАТАН-600 работал в одномерном режиме, получая серию сканов Солнца в каналах I и V один раз в сутки вблизи местного полдня (9:40 UT) в диапазоне λ 1.92—4.9 см. Наивысшее разрешение на самой короткой волне составляло 17". Точность измерений яркостной температуры излучения по наблюдениям на РАТАН-600 находилась в пределах 5—20 % в зависимости от длины волны и интенсивности локального источника (она пропорциональна I).

Наблюдения на ССРТ использовались как в виде карт, так и в виде одномерных сканов. Рабочая длина волны ССРТ равна $\lambda = 5.2$ см, размеры синтезированной двумерной диаграммы направленности — 20". Инструмент работал в режиме квазислежения, а средняя скважность между соседними кадрами составляла около 3.5 мин.

На РТ-22 наблюдения проводились 5—7 октября 2002 г. на трех длинах волн $\lambda = 2.0, 2.3, 3.5$ см с угловым разрешением 3.6, 4.1 и 6.0' соответственно. Чувствительность по потоку равнялась $0.1 \cdot 10^{-22}$ Вт/(м²Гц) при временном разрешении около 1 с. Средняя длительность непрерывного слежения за АО NOAA 0139 составляла около 6.5 ч. Поляриметр позволял регистрировать параметры Стокса I и V . В это время интенсивность излучения АО NOAA 0139 на волне $\lambda = 3.5$ см превышала уровень спокойного Солнца на 100—200 %.

ОБРАБОТКА НАБЛЮДЕНИЙ

Наблюдения Солнца на РАТАН-600 обрабатывались по программе В. И. Гараимова. Для разделения структуры локального источника на отдельные детали применялся гаусс-анализ, а отождествление этих деталей происходило путем сопоставления с фотогелиограммой и магнитограммой АО, полученных на SOHO (MDI). Вследствие падения разрешающей способности радиотелескопа координаты отдельных деталей фиксировались с использованием результатов, полученных на коротких длинах волн.

Результаты наблюдений на ССРТ использовались для построения радиокарт АО. Они накладывались на магнитограммы с помощью методики, разработанной В. В. Гречневым. Для более детального исследования эволюции изображений, помимо данных SOHO, мы также привлекали ультрафиолетовые наблюдения TRACE (<http://www.solarmonitor.org>).

Изучение пульсаций осуществлялось с помощью вейвлет-анализа, который в отличие от анализа Фурье позволяет одинаково хорошо выявлять как высокочастотные, так и низкочастотные характеристики сигнала [1]. В качестве базисного нами был выбран комплексный вейвлет Морле $\psi(t) = \exp(-t^2/2)\exp(i2\pi t)$. На его основе строилось интегральное вейвлет-преобразование исследуемого временного ряда $f(t_k)$, $k = 1, \dots, m$:

$$W_{\psi}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t_k) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt,$$

где звездочкой обозначена комплексно сопряженная величина. При выполнении вейвлет-преобразования находилась корреляция между анализируемым рядом $f(t_k)$ и выбранным вейвлетом $\psi(t)$, который растягивался и сдвигался по длине реализации. В результате образовывался двумерный массив коэффициентов $W_{\psi}(a, b)$, и вычислялась скалограмма $S(a_i, b_j) = |W_{\psi}(a_i, b_j)|^2$, описывающая распределение энергии по масштабам. Поскольку нас интересовали усредненные по времени характеристики, то для

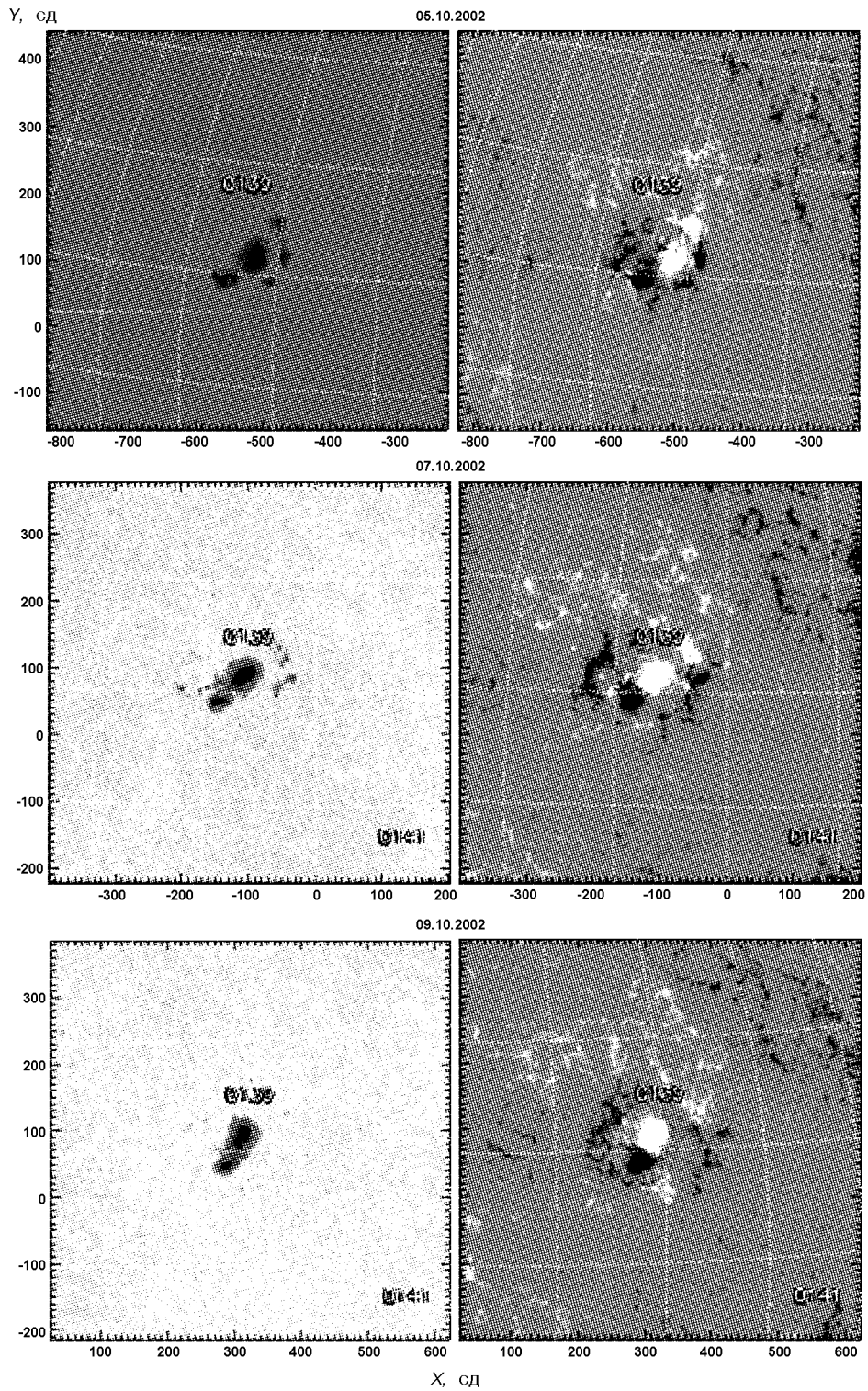


Рис. 1. Изображения в континууме (слева) и магнитограммы (справа) АО NOAA 0139, полученные на SOHO (MDI). Белый цвет соответствует положительной (N) полярности

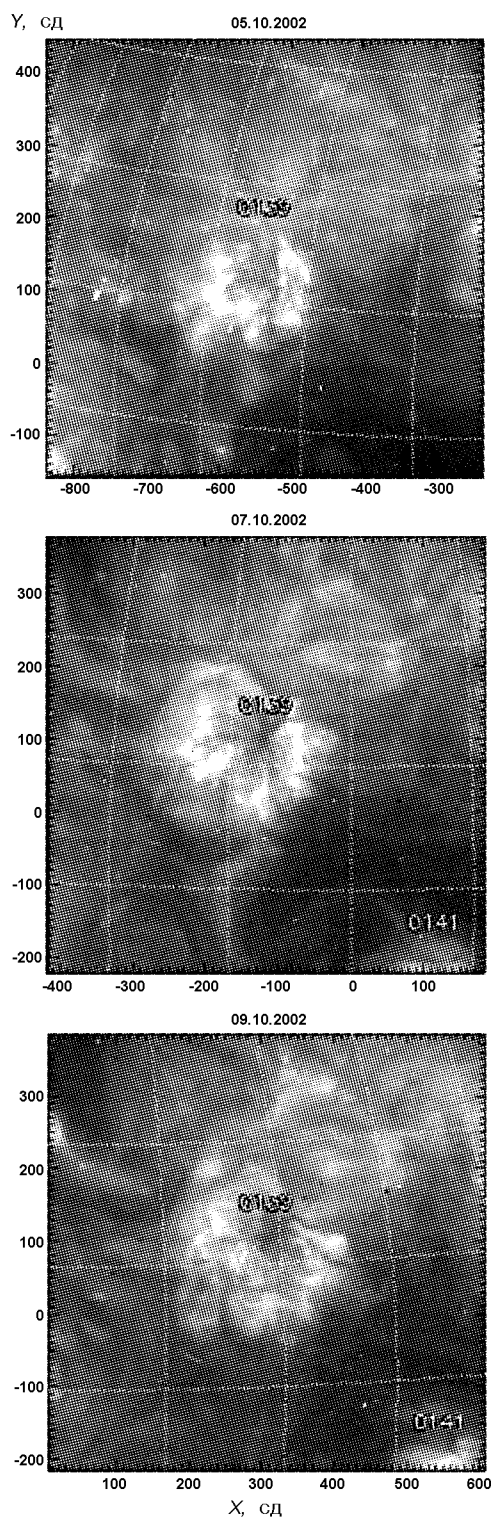


Рис. 2. Изображения АО NOAA 0139, полученные на TRACE в линии Fe XV λ 28.4 нм

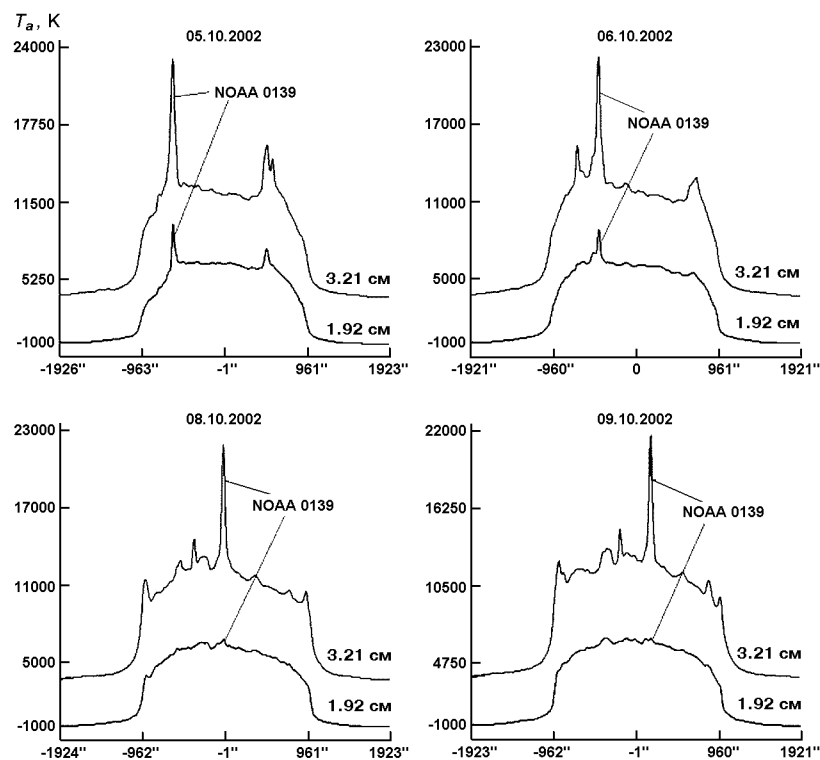


Рис. 3. Временная последовательность радиометрических измерений антенной температуры T_a ($\lambda = 1.92$ и 3.21 см), полученных на РАТАН-600 при сканировании диска Солнца

оценки глобального спектра энергии использовалась функция, называемая скейлограммой

$$G(a_i) = 1N \sum_j S(a_i, b_j),$$

где N — число точек, по которым осуществляется усреднение. Скейлограмму можно рассматривать как аналог сглаженной периодограммы в фурье-анализе.

На практике временной ряд разбивался на участки длительностью около 1 ч. Поскольку нас интересовали короткопериодические «колебания» (10—600 с), то перед построением скейлограмм из исследуемого профиля вычитался тренд, который строился на основе полинома 20-го порядка. Мы старались исключать участки с достаточно мощными всплещечными событиями. При этом слабые всплески, способные привести к замыванию в спектре проявлений ЭВС, сглаживались с помощью линейной интерполяции.

ЭВОЛЮЦИЯ, СТРУКТУРА И ИЗЛУЧЕНИЕ NOAA 0139

На уровне фотосферы АО NOAA 0139, отличающаяся умеренной всплещечной активностью, представляла собою группу пятен площадью около $6 \cdot 10^{-4} S$, где S — площадь полусферы Солнца, в которой устойчиво доминировало пятно N-полярности (рис. 1). Наибольшие изменения в нем

отмечены в период с 05.10.02 на 07.10.02, когда по данным SOHO (MDI) произошло значительное увеличение максимальной напряженности магнитного поля приблизительно с 1.2 до 1.8 кГс. Вместе с тем его структура в фотосфере с 05.10.02 (N14E33) по 09.10.02 (N11W21) упрощалась. Это следует как из визуальных оценок, так и из сводных данных мониторинга активных областей (<http://www.bbso.njit.edu>). Согласно данным из того же сайта вспышечная активность АО постепенно ослабевала. Причем изображения в линии Fe XV (28.4 нм), представленные на рис. 2, свидетельствуют, что источники УФ-излучения со временем становились менее контрастными.

На рис. 3, 4 показана последовательность сканов и карт. Наиболее интересная особенность состоит в том, что в рассматриваемый период времени наблюдалась нарастающая депрессия излучения в коротковолновой части спектра ($\lambda \approx 2$ см), которая генетически связана с основным пятном АО. Интенсивность на волнах с $\lambda > 3$ см также уменьшалась, однако это выражено гораздо слабее. Поскольку пятенная составная излучения доминировала во всей АО, то, как и следовало ожидать, данные особенности хорошо согласуются с результатами наблюдений на РТ-22.

Спектрально-поляризационные характеристики, полученные на РА-ТАН-600 (рис. 5), свидетельствуют в пользу циклотронной природы микроволнового излучения АО. На это указывают большие значения степени поляризации P и яркостной температуры T_b , а также их функциональные зависимости от λ . Известно, что циклотронное излучение на частоте f генерируется в сравнительно тонких прослойках, называемых гирослоями, в которых $f \approx lf_B$, где $l = 1, 2, 3, \dots$ — номер гармоники, $f_B = eB/(2\pi mc)$ — гирочастота электронов [4]. Поэтому на горизонтальной оси верхнего графика рис. 5 приведена шкала напряженностей магнитного поля, соответствующая области излучения необыкновенных волн, в которой $l = 3$ [4]. Рассчитанные нами величины предполагают возможность проникновения в основание солнечной короны магнитных полей, достигающих 80 мТл.

Типичные скейлограммы временных профилей интенсивности (рис. 6), построенные по данным наблюдений на РТ-22 в различные дни, изображены на рис. 7. Видно, что наблюдавшийся 05.10.02 пик в области частот 6—10 мГц (100—170 с) со временем постепенно сглаживался. При этом скейлограммы на разных длинах волн вели себя подобным образом. Это предполагает тесную связь между процессами, которые происходили на различных высотах верхней атмосферы Солнца.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Как следует из полученных результатов, 5—9 октября 2002 г. уменьшение вспышечной активности, а также яркости источников УФ-излучения сопровождалось упрощением магнитной конфигурации АО NOAA 0139. Наиболее интересная особенность состояла в том, что на коротких волнах депрессия потока излучения АО оказалась гораздо более значительной, чем на длинных. В связи с этим возникает вопрос о природе данного явления. В рассматриваемом случае наиболее аргументированными нам представляются следующие две гипотезы.

Можно предположить, что напряженность магнитного поля в верхней атмосфере Солнца со временем уменьшалась. При этом источники излучения на длинных волнах продолжали оставаться в короне, тогда как на коротких волнах опустились в хромосферу. Это и привело к резкому падению интенсивности излучения, а также степени поляризации. Хотя

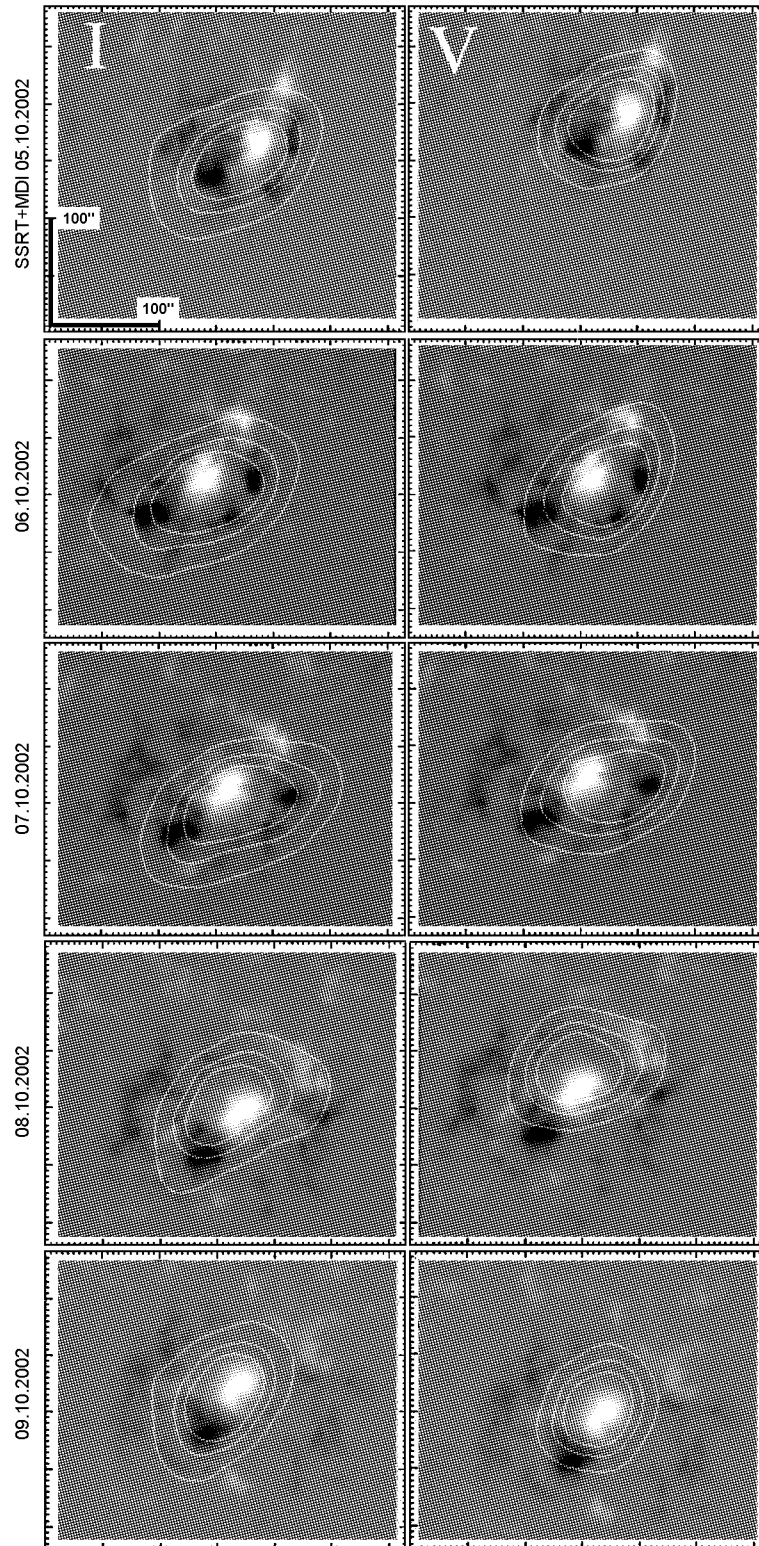


Рис. 4. Последовательность карт параметров Стокса I и V для АО NOAA 0139 (CCPT), наложенных на магнитограммы SOHO MDI

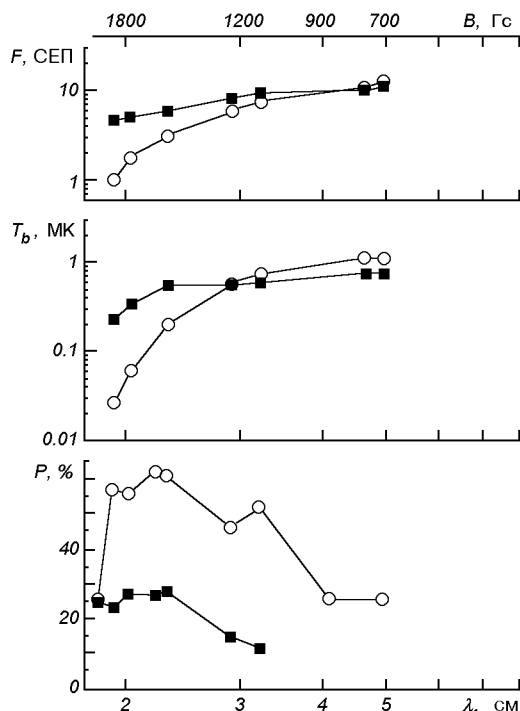


Рис. 5. Спектральные кривые для потока F , яркостной температуры T_b и степени поляризации $P = V/I$ излучения локального источника, расположенного над главным пятном северной полярности АО NOAA 0139, по наблюдениям на РАТАН-600. Квадратики — данные для 5 октября, кружки — 8 октября 2002 г.

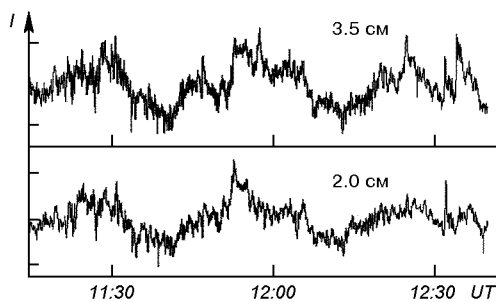


Рис. 6. Вариации интенсивности АО NOAA 0139 5 октября 2002 г. (РТ-22)

данный сценарий хорошо согласуется с некоторыми модельными расчетами [40], тем не менее, в рамках таких представлений трудно понять, почему в фотосфере напряженность магнитного поля увеличивалась, а в верхней атмосфере Солнца, наоборот, уменьшалась.

На наш взгляд, более убедительным выглядит предположение о том, что энерговыделение в верхней атмосфере Солнца носило мелкомасштабный характер. Наблюдаемое изменение яркостной температуры могло произойти из-за уменьшения эффективности нагрева плазмы в области излучения. В пользу такого заключения свидетельствуют УФ-изображения АО (рис. 2),

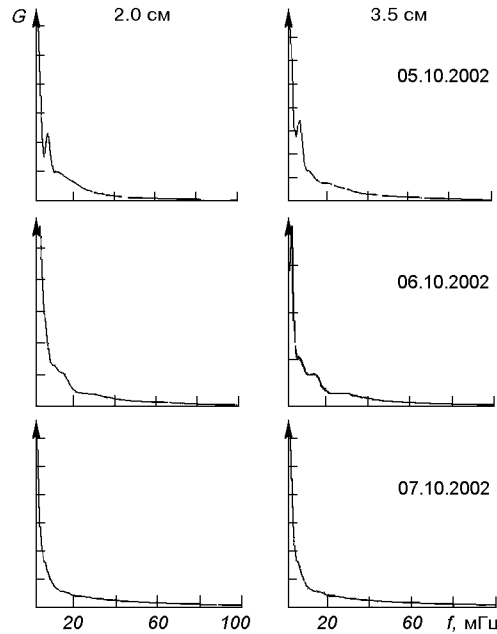


Рис. 7. Скейлограммы, полученные после обработки методами вейвлет-анализа временных профилей интенсивности излучения АО NOAA 0139 (PT-22) на $\lambda = 2.0$ и 3.5 см

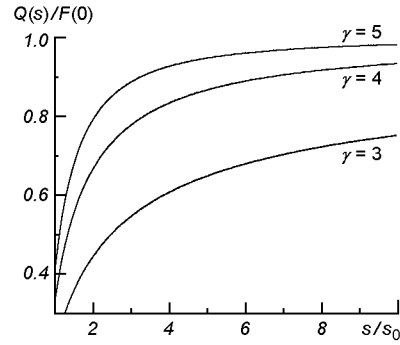
предполагающие возможность постепенного охлаждения плазмы локального источника. Это также следует из довольно сильной зависимости оптической толщины циклотронного излучения τ от эффективной температуры: $\tau \propto T^{l-1}$ [4]. Особо отметим обнаруженную на скейлограммах постепенную депрессию «колебаний» с характерным «периодом» 100—170 с (рис. 7), которую было бы естественно связать с уменьшением частоты и мощности ЭВС. К настоящему времени получено много указаний в пользу аналогии между механизмами вспышечного энерговыделения на различных масштабах [11, 22, 23, 27, 31]. Поэтому значительное падение микроволнового излучения на коротких длинах волн могло быть вызвано уменьшением потока ускоренных в короне электронов, ответственных за нагрев переходной области и верхней хромосферы, где из-за более высокой плотности плазмы должна происходить эффективная трансформация энергии быстрых частиц в тепловую. Также заметим, что перенос энергии за счет теплопроводности не позволяет объяснить, с одной стороны, корреляцию между амплитудами пиков в разные дни для $\lambda = 2.0$ и 3.5 см (рис. 7), а с другой — слабую временную зависимость между интенсивностями на коротких и длинных волнах (рис. 3).

Следуя Б. В. Сомову и С. И. Сыроватскому [7], рассмотрим некоторые особенности нагрева плазмы ускоренными электронами. Спектр частиц с минимальной энергией E_0 , пронизывающих переходной слой и верхнюю хромосферу Солнца, начиная с высоты $s = 0$, представим в виде

$$N(E, 0) = KE^{-\gamma-1/2}\Theta(E - E_0), \quad (1)$$

где K — нормировочный коэффициент, $\Theta(x)$ — ступенчатая функция Хэвисайда. Если $\gamma > 2$, то поток энергии ускоренных электронов будет равен

Рис. 8. Зависимость относительного потока энергии $Q(s)/F(0)$, передаваемого частицам фоновой плазмы ускоренными электронами, от относительной глубины s/s_0



$$F(0) = \int_{E_0}^{\infty} EVN(E, 0)dE = \frac{K}{\gamma - 2} \sqrt{\frac{2}{m}} E_0^{2-\gamma}, \quad (2)$$

где V — скорость частиц, m — масса электрона.

В результате кулоновских столкновений быстрого электрона с фоновой плазмой изменение его энергии составляет

$$\frac{dE}{ds} = -\frac{an}{E}, \quad (3)$$

где $a = 3 \cdot 10^{-12}$ эВ²см². Тогда поток энергии электронов на глубине s можно записать в виде

$$F(s) = \int_{\tilde{E}}^{\infty} EVN(E, s)dE, \quad (4)$$

где $\tilde{E} = \sqrt{E_0^2 - 2asn}$.

Решение уравнения непрерывности

$$\frac{\partial}{\partial s} [VN(E, s)] + \frac{\partial}{\partial E} \left[\frac{dE}{ds} VN(E, s) \right] = 0$$

с учетом (4) сводится к виду

$$N(E, s) = KE^{1/2}(E^2 + 2asn)^{-(\gamma+1)/2} \Theta(\sqrt{E^2 + 2asn} - E_0). \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4) и принимая во внимание (2) и (3), получим

$$\frac{F(s)}{F(0)} = \frac{\gamma - 2}{2} B\left(\frac{3}{2}, \frac{\gamma - 2}{2}\right) \left(\frac{s_0}{s}\right)^{\frac{\gamma-2}{2}}, \quad (6)$$

где $B(x, y)$ — бета-функция, $s = E^2/(2an) \geq s_0 = E_0^2/(2an)$. Согласно (6) поток энергии, передаваемый фоновой плазме по достижении электронами глубины s , равен

$$Q(s) = F(0) - F(s) = F(0) \left[1 - \frac{\gamma-2}{2} B\left(\frac{3}{2}, \frac{\gamma-2}{2}\right) \left(\frac{s_0}{s}\right)^{\frac{\gamma-2}{2}} \right]. \quad (7)$$

График функции $Q(s)/F(0)$, представленный на рис. 8, предполагает, что основная часть кинетической энергии ускоренных электронов с показателем спектра $\gamma \geq 4$ при прохождении ими глубины $s \sim s_0$ идет на нагрев фоновой плазмы. Положив минимальную энергию электронов $E_0 = 3$ кэВ, концентрацию плазмы $n = 3 \cdot 10^{10} - 10^{11}$ см⁻³, получим $s_0 = E_0^2/(2an) =$

$= (1.5—4.5) \cdot 10^7$ см. Следовательно, энергичные частицы способны эффективно нагревать тонкую прослойку плазмы толщиной несколько сот километров на уровне переходной области и верхней хромосферы Солнца. Также отметим, что если принять характерный масштаб изменения магнитного поля с высотой $H_B = VdH/dB$ и учесть, что излучение генерируется на гармониках гирочастоты f_B , нетрудно найти характерное расстояние между гируровнями

$$\Delta H = H_B \ln \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right). \quad (8)$$

Полагая в (8) $H_B = 10^9$ см, $\lambda_1 = 2.0$ см, $\lambda_2 = 3.5$ см, находим $\Delta H = 5600$ км. Сравнив s_0 и ΔH , нетрудно прийти к выводу, что расстояния между гирослоями, ответственными за генерацию микроволнового излучения на $\lambda = 2.0$ и 3.5 см, может заметно превышать характерную толщину нагреваемого слоя s_0 .

Для оценки толщины самих гирослоев h воспользуемся выражением [4]

$$h = 2\sqrt{2} H_B \beta_T |\cos \alpha|, \quad (9)$$

где $\beta_T = V_T/c \approx 1.3 \cdot 10^{-5} \sqrt{T}$ — отношение тепловой скорости электронов V_T к скорости света c , α — угол между направлением магнитного поля и волновым вектором. При $T = 3 \cdot 10^5—10^6$ К и $\alpha = 30^\circ$ уравнение (9) дает $h = 170—320$ км. Из сравнения ΔH и h следует, что источники, ответственные за излучение на $\lambda = 2.0$ см и 3.5 см, не перекрываются.

Полный поток ускоренных электронов с площадью сечения пучка A , учитывая уравнение (1), представим следующим образом:

$$\frac{dN_\Sigma}{dt} = A \int_{E_0}^{\infty} N(E, 0) v dE = \frac{AK}{\gamma - 1} \sqrt{\frac{2}{m}} E_0^{1-\gamma}. \quad (10)$$

Подставляя выражение (2) в (10), получим

$$\frac{dN_\Sigma}{dt} = A \frac{\gamma - 2}{\gamma - 1} \frac{F(0)}{E_0}. \quad (11)$$

Потери энергии могут быть вызваны либо излучением, либо электронной теплопроводностью. В случае радиационных потерь поток излучения [6]

$$I_r \approx n^2 E(T), \quad (12)$$

где $E(T) = 3.6 \cdot 10^{-29}$ Дж·см³с⁻¹ — функция радиационных потерь при $T = (0.02—2) \cdot 10^6$ К, а тепловой поток [6] —

$$F_c \approx 10^{-13} \frac{T^{7/2}}{s}, \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}. \quad (13)$$

Полагая $F_r \approx I_r s$ и принимая во внимание (11) и (13), имеем

$$\frac{F_r}{F_c} \approx 3.6 \cdot 10^{-9} \frac{(ns)^2}{T^{7/2}}. \quad (14)$$

Для $n = 3 \cdot 10^{10}—10^{11}$ см⁻³, $s = 3 \cdot 10^7$ см, $T = 3 \cdot 10^5$ К из (14) находим $F_r/F_c \approx 20—200$. Следовательно, радиационные потери энергии в переходной области и верхней хромосфере Солнца значительно превышают теплопроводные.

Учитывая баланс энергий, $F_r \approx F(0)$, согласно (11) и (12) находим

$$\frac{dN_{\Sigma}}{dt} = A \frac{\gamma - 2}{\gamma - 1} \frac{n^2 E(T) s}{E_0}. \quad (15)$$

Положив в выражении (15) $A = 10^{18} \text{ см}^2$, $\gamma = 4$, $n = 3 \cdot 10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $E(T) = 3.6 \cdot 10^{-29} \text{ Дж} \cdot \text{см}^3 \text{ с}^{-1}$, $s = 3 \cdot 10^7 \text{ см}$, $E_0 = 3 \text{ кэВ}$, получим $dN_{\Sigma}/dt = 10^{33} - 10^{34} \text{ с}^{-1}$, что на 3—4 порядка меньше типичных значений, привлекаемых для интерпретации жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек класса X [25].

В ходе рассмотрения торможения ускоренных электронов в переходной области и верхней атмосфере Солнца мы пренебрегли их рассеянием на частицах фоновой плазмы. Вследствие этого полученные нами оценки $F(s)$, а значит, s_0 и dN_{Σ}/dt должны быть несколько завышенными. В связи с этим обратимся к результатам работы Эмсли [13], в которой с учетом рассеяния электронов была получена следующая формула для максимальной мощности теплового энерговыделения, достигаемая при $s = s_0$:

$$I_b(s_0) = \frac{a(\gamma - 2)n}{2E_0^2} B\left(\frac{\gamma}{2}, \frac{1}{3}\right) F(0). \quad (16)$$

Подставив (11) и (12) в (16), вместо (15) имеем

$$\frac{dN_{\Sigma}}{dt} = \frac{2AnE_0E(T)}{a(\gamma - 1) B\left(\frac{\gamma}{2}, \frac{1}{3}\right)}. \quad (17)$$

Принимая, как и в предыдущем случае, $A = 10^{18} \text{ см}^2$, $\gamma = 4$, $n = 3 \cdot 10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $E_0 = 3 \text{ кэВ}$, $E(T) = 3.6 \cdot 10^{-29} \text{ Дж}$, из выражения (17) находим $dN_{\Sigma}/dt = (6 - 60) \cdot 10^{32} \text{ с}^{-1}$, что незначительно отличается от полученных ранее результатов.

Таким образом, ускоренные в ходе мелкомасштабных процессов энерговыделения электроны способны вносить заметный вклад в нагрев переходной области и верхней атмосферы Солнца. Поэтому предположение о связи депрессии излучения на коротких длинах волн с понижением температуры плазмы в л.и, вызванной уменьшением потоков ускоренных электронов, пронизывающих переходную область и верхнюю хромосферу АО, представляется достаточно аргументированным.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В представленной работе на основе радионаблюдений исследована эволюция и структура АО NOAA 0139. Как следует из проведенного анализа, а также оптических и УФ-данных, сильную депрессию микроволнового излучения, обнаруженную на коротких длинах волн, можно объяснить уменьшением числа и мощности ЭВС. В результате нагрев плазмы переходной области и верхней хромосферы потоками ускоренных электронов стал менее эффективным, а понижение температуры более существенным, чем в корональной части АО.

При проведении вейвлет-анализа мы ограничились исследованием вариаций микроволнового излучения с «периодами» менее 10 мин. Это объясняется тем, что характерное время радиационного охлаждения плазмы $\tau = 3kT/nE(T) \approx 1.15 \cdot 10^6 T/n \text{ [с]}$. Положив $T = 10^6 \text{ К}$, $n = 10^{10} \text{ см}^{-3}$, из

последней формулы получим $\tau \approx 115$ с. Хотя данная оценка является очень грубой, тем не менее из нее следует, что характерное время жизни ЭВС в верхней атмосфере Солнца должно составлять несколько минут. Данный вывод хорошо согласуется как с наблюдениями, полученными на Yohkoh [33], SOHO [19] и RHESSI [11], так и с некоторыми теоретическими моделями [34, 35]. При этом возможный вклад нетеплового гиротронного излучения должен быть пренебрежимо мал в сантиметровом диапазоне, если энергия ускоренных электронов $E < 50\text{--}100$ кэВ [12]. Однако роль нетепловой составляющей на больших длинах волн может оказаться гораздо более существенной. Об этом свидетельствуют, например, спектральные особенности излучения так называемого дециметрового гало, которое представляет собой диффузионное образование повышенной радиояркости, охватывающее всю АО [2].

Согласно данным скейлограмм мощность энерговыделения и частота ЭВС по мере эволюции АО заметно уменьшилась, но поток микроволнового излучения на длинных волнах изменился незначительно. Поэтому хотя вклад ЭВС в нагревание солнечной короны АО и заметный, однако он не является определяющим. Это свидетельствует, по нашему мнению, в пользу важной роли диссипативных процессов, обусловленных магнитогидродинамическими волнами (см. также [6]).

Наблюдаемое увеличение степени поляризации излучения локального источника практически во всем диапазоне частот могло определяться перемещением АО в направлении центрального меридиана из-за вращения Солнца. Оптическая толщина циклотронного излучения сильно зависит от угла между магнитным полем и лучом зрения α [4]. Поэтому по мере уменьшения α третий гирорезонансный уровень мог стать более прозрачным для обыкновенных мод, оставаясь при этом оптически толстым для необыкновенного излучения. В результате разность яркостных температур для волн с правой и левой круговой поляризацией увеличилась, что и привело к повышению степени поляризации [5, 38, 39].

Поток микроволнового излучения, несмотря на увеличение напряженности магнитного поля, продолжал уменьшаться. Данное обстоятельство несколько противоречит результатам работ [16, 17, 26], в соответствии с которыми эффективность нагрева короны активных областей с увеличением магнитного потока должна возрастать. Вместе с тем наблюдаемая эволюция магнитного поля АО хорошо согласуется с представлениями о связи высокой температуры короны с нейтральной линией и углом (широм) между поперечными компонентами наблюдаемого и потенциального магнитного поля [14, 15]. Поэтому ЭВС скорее обусловлены взаимодействием мелко-масштабных магнитных петель, а не переплетением магнитных силовых линий внутри них. Это предполагает, что хотя модель Паркера [28] и подтверждается некоторыми результатами наблюдений [16, 26], однако она требует дальнейших исследований.

В заключение отметим, что многие особенности микроволнового излучения АО могут быть обусловлены неоднородностью плазмы и магнитного поля в источнике [38]. Поэтому необходимы новые наблюдения в различных волновых диапазонах с пространственным разрешением, превышающим $1''$. Лишь при таком рафинированном подходе можно получить надежные данные, позволяющие сделать более обстоятельные выводы о природе магнитной активности в верхней атмосфере Солнца.

Работа поддержана РФФИ (гранты 06-02-16838, 06-02-17357) и программой ОФН-16.

1. Витязев В. В. Вейвлет-анализ временных рядов. — С.-Пб.: Изд-во С.-Пб. ун-та, 2001.—58 с.
2. Гельфрейх Г. Б. Исследование магнитосфер активных областей Солнца // Изв. АН. Сер. физ.—1995.—59, № 7.—С. 90—97.
3. Гельфрейх Г. Б., Цан Ю. Т., Копылова Ю. Г. и др. О вариациях микроволнового излучения активных областей солнечной атмосферы // Письма в Астрон. журн.—2004.—30, № 7.—С. 540—547.
4. Железников В. В. Электромагнитные волны в космической плазмы. — М: Наука, 1977.—432 с.
5. Кальтман Т. И., Коржавин А. Н., Цан Ю. Т. О смене знака поляризации микроволнового излучения в пятенных радиоисточниках на Солнце // Астрон. журн.—2005.—82, № 9.—С. 838—846.
6. Прист Э. Р. Солнечная магнитогидродинамика. — М.: Мир, 1985.—592 с.
7. Солов Б. В., Сыроватский С. И. Физические процессы в атмосфере Солнца, вызываемые вспышками // Успехи физ. наук.—1976.—120, № 2.—С. 217—257.
8. Цан Ю. Т., Шаховская А. Н. Граничные условия и формирование полостей в окрестности прогуберанцев // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—16, № 4.—С. 303—314.
9. Aschwanden M. J., Tarbell T. D., Nightingale R. W., et al. Time variability of the «quiet» Sun observed with TRACE. II. Physical parameters, temperature evolution, and energetics of extreme-ultraviolet nanoflares // Astrophys. J.—2000.—535, N 2.—P. 1047—1065.
10. Bellan P. M. Alfvén «resonance» reconsidered: Exact equations for wave propagation across a cold inhomogeneous plasma // Phys. Plasmas.—1994.—1, N 11.—P. 3523—3541.
11. Benz A. O., Grigis P. C. Microflares and hot component in solar active regions // Solar Phys.—2002.—210, N 1/2.—P. 431—444.
12. Dulk G. A. Radio emission from the Sun and stars // Annu. Rev. Astron. and Astrophys.—1985.—23.—P. 169—224.
13. Emslie A. G. The collisional interaction of a beam of charged particles with a hydrogen target of arbitrary ionization level // Astrophys. J.—1978.—224, N 1.—P. 241—246.
14. Falconer D. A. A correlation between length of strong shear neutral lines and total X-ray brightness in active regions // Solar Phys.—1997.—176, N 1.—P. 123—126.
15. Falconer D. A., Moore R. L., Porter J. G., et al. Neutral-line shear enhanced coronal heating in solar regions // Astrophys. J.—1997.—482, N 1.—P. 519—534.
16. Fisher G. H., Longcope D. W., Metcalf T. R., Pevtsov A. A. Coronal heating in active regions as a function of global magnetic variables // Astrophys. J.—1998.—508, N 2.—P. 885—898.
17. Gohub L., Maxson C., Rosner R., et al. Magnetic fields and coronal heating // Astrophys. J.—1980.—238, N 1.—P. 343—348.
18. Hudson H. S. Solar flares, microflares, nanoflares, and coronal heating // Solar Phys.—1991.—133, N 1.—P. 357—369.
19. Judge P., Carlsson M., Wilhelm K. SUMER observations of the quiet solar atmosphere: the network chromosphere and lower transition region // Astrophys. J.—1998.—490, N 2.—P. L195—L198.
20. Klimchuk J. A. On solving the coronal heating problem // Solar Phys.—2006.—234, N 1.—P. 41—77.
21. Krucker S., Benz A. O. Energy distribution of heating processes in the quiet solar corona // Astrophys. J.—1998.—501, N 2.—P. L213—L216.
22. Lin R. P., Schwartz R. A., Kane S. R., et al. Solar hard X-ray microflares // Astrophys. J.—1984.—283, N 1.—P. 421—425.
23. Liu C., Qiu G., Gary D. E., et al. Studies of microflares in RHESSI hard X-ray, Big Bear Solar Observatory H_{α} , and Michelson Doppler Imager magnetograms // Astrophys. J.—2004.—604, N 1.—P. 442—448.
24. Mandrini C. H., Demoulin P., Klimchuk J. A. Magnetic field and plasma scalling laws: their implications for coronal heating models // Astrophys. J.—2000.—530, N 2.—P. 999—1015.
25. Miller J. A., Cargill P. J., Emslie A. G., et al. Critical issues for understanding particle acceleration in impulsive solar flares // J. Geophys. Res.—1997.—102, N A7.—P. 14631—14659.
26. Milligan R. O., Gallagher P. T., Mathioudakis M., et al. Plasma diagnostics of active-region evolution and implications for coronal heating // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2005.—363, N 1.—P. 259—267.
27. Nindos A., Kundu M. R., White S. M. A study of microwave-selected coronal transient brightenings // Astrophys. J.—1999.—513, N 2.—P. 983—989.
28. Parker E. N. Magnetic neutral sheets in evolving fields. II. Formation of the solar corona // Astrophys. J.—1983.—264, N 2.—P. 642—647.
29. Parnell C. E., Jupp P. E. Statistical analysis of the energy distribution of nanoflares in the quiet Sun // Astrophys. J.—2000.—529, N 1.—P. 554—569.

30. Porter J. G., Toomre J., Gebbie K. B. Frequent ultraviolet brightenings observed in a solar active region with Solar Maximum Mission // *Astrophys. J.*—1984.—**283**, N 2.—P. 879—886.
31. Qiu J., Liu C., Gary D. E., et al. Hard X-Ray and microwave observations of microflares // *Astrophys. J.*—2004.—**612**, N 1.—P. 530—545.
32. Roberts B. Waves and oscillations in the corona // *Solar Phys.*—2000.—**193**, N 1/2.—P. 139—152.
33. Shimizu T. Energetics and occurrence rate of active-region transient brightenings and implications for the heating of the active-region corona // *Publs Astron. Soc. Jap.*—1995.—**47**, N 2.—P. 251—263.
34. Spadaro D., Lanza A. F., Kappen J. T., Antiochos S. K. A transient heating for the structure and dynamics of the solar transition region // *Astrophys. J.*—2006.—**642**, N 1.—P. 579—583.
35. Taroyan Y., Bradshaw S. J., Doyle J. G. Nanoflares heating of coronal loops: hydrodynamic response and observational consequences // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**446**, N 1.—P. 315—325.
36. Vaiana, G. S., Krieger A. S., Timothy A. F. Identification and analysis of structures in the corona from X-ray photography // *Solar. Phys.*—1973.—**32**, N 1.—P. 81—116.
37. Van Speybroeck L. P., Krieger A. S., Vaiana G. S. X-Ray Photographs of the Sun on March 7, 1970 // *Nature*—1970.—**227**, N 5260.—P. 818—822.
38. Vourlidas A., Bastian T. S., Aschwanden M. J. The structure of the solar corona above sunspots as inferred from radio, X-ray, and magnetic field observations // *Astrophys. J.*—1997.—**489**, N 1.—P. 403—425.
39. White S. M., Kundu M. R. Radio observations of gyroresonance emission from coronal magnetic fields // *Solar Phys.*—1997.—**174**, N 1/2.— P. 31—52.
40. Zhao R. A model of SVC radiation in magnetic dipole field and radiation varying with magnetic field // *Sci. in China.*—1991.—**34**, N 9.—P. 1109—1118.
41. Zirker J. B. Coronal heating // *Solar Phys.*—1993.—**148**, N 1.—P. 43—60.

Поступила в редакцию 26.05.06