

Исследование параметров солнечных вспышек в трехмиллиметровом диапазоне волн

А. В. Антонов, Ю. М. Герасимов, Ю. В. Карелин

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: gerasim@rian.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 3 июля 2007 г.

Рассмотрены две мощные солнечные вспышки рентгеновского класса M8.2 и M6.1, наблюдавшиеся 10.04.2002 г. и 12.09.2005 г. в период максимума и минимума солнечной активности. Проведено исследование динамического спектра излучения вспышек в 3-мм диапазоне, зарегистрированных на радиотелескопе РТ-2. На основании обнаруженных в изображениях вспышечной области в линии 195 Å изгибных колебаний магнитных трубок и данных динамического спектра оценены параметры вспышечной плазмы. Оценены геометрические размеры элементарных магнитных трубок и их численность в аркаде для вспышки класса M8.2.

Введение

Радиоастрономические исследования солнечных вспышек позволяют получать важную информацию о физических процессах в активных областях, которые приводят к взрывному характеру энерговыделения. Основными структурными элементами этих областей являются корональные магнитные петли, в которых происходит преобразование выделяющейся энергии и генерация мощного электромагнитного излучения. Анализ осцилляций этого излучения позволяет оценить физические условия в корональных магнитных петлях во время солнечных вспышек [1]. Параметры осцилляций, такие, как глубина модуляции, период повторения пульсаций и их декремент затухания, зависят от пространственных параметров вспышечной области, ее температуры, концентрации плазмы, величины магнитного поля, отношения газового и магнитного давлений. Исследования этой связи и разработка методики диагностики вспышечной плазмы по данным излучения в рентгеновском диапазоне [2] были развиты для применения в микроволновом диапазоне [3-7]

с привлечением различных механизмов излучения. При этом необходимые для диагностики пространственные параметры вспышечной области оценивались по ее виду в рентгеновском диапазоне излучения. Однако для повышения точности оценки параметров плазмы и детального анализа вспышечных процессов необходимо привлекать изображения с более высоким угловым разрешением, чем это достижимо в рентгеновском диапазоне. В настоящее время наибольшее угловое разрешение порядка 1.25" имеют изображения активных областей в линии излучения ионизированных химических элементов, получаемые ультрафиолетовыми телескопами спутника TRACE.

Важную дополнительную информацию о корональных магнитных петлях и о параметрах вспышечной плазмы можно получить из наблюдений в миллиметровом диапазоне волн [8]. Целью настоящей работы является развитие методики диагностики параметров вспышечной плазмы и анализ солнечных вспышек, зарегистрированных радиотелескопом РТ-2 [9] в 3-мм диапазоне волн.

Основные соотношения в диагностике вспышечной плазмы

Наблюдаемая в мм диапазоне плотность потока S_ν гиротронного излучения оптически тонкого источника на частоте ν связана с его объемом V , расстоянием до источника R и коэффициентом излучения η_ν следующим образом:

$$S_\nu = \eta_\nu V R^{-2}. \quad (1)$$

Значения коэффициентов излучения для гиротронного механизма излучения на основании расчетов, выполненных в [10], были экстраполированы нами в область более высоких частот, и для отношения частоты излучения ν и гиротронной частоты ν_B $20 \leq \nu/\nu_B \leq 200$ получена формула аппроксимации η_ν/BN , которая имеет следующий вид:

$$\eta_\nu = 2.62 \cdot 10^{-20} \cdot 10^{-0.83\delta} \times (\sin \theta)^{-0.43+0.65\delta} \left(\frac{\nu}{\nu_B} \right)^{0.6-0.7\delta} BN. \quad (2)$$

Здесь δ – спектральный индекс распределения нетепловых электронов по энергиям; θ – угол между вектором магнитного поля и лучом зрения; B – магнитная индукция, Тл; N – концентрация нетепловых электронов, м^{-3} . В соответствии с (2) имеем следующую зависимость:

$$\eta_\nu \sim N \nu^\alpha B^{1-\alpha}, \quad (3)$$

где $\alpha = 0.6 - 0.7\delta$. Учитывая замороженность магнитного поля в проводящую плазму, когда $V \sim 1/B$, из (3) в соответствии с (1) получим:

$$S_\nu \sim N \nu^\alpha B^{-\alpha}. \quad (4)$$

Согласно [7] во время вспышки в режиме умеренной диффузии концентрация ускоренных

электронов практически не меняется. Поэтому выражение (4) определяет зависимость вариаций плотности потока гиротронного излучения от вариаций магнитного поля. Модуляцию плотности потока излучения M определим как $M = 1 - \frac{S_{\nu\min}}{S_{\nu\max}}$, где $S_{\nu\min}$ и $S_{\nu\max}$ соответственно минимальная и максимальная регистрируемая плотность потока. Тогда, учитывая связь плотности потока излучения с магнитным полем (4), получим:

$$M = 1 - \left(\frac{B - \Delta B}{B + \Delta B} \right)^{-\alpha}, \quad (5)$$

где ΔB – амплитуда флуктуаций магнитного поля. Для случая малых флуктуаций, когда $\Delta B/B \ll 1$, из выражения (5) получим:

$$M = 2\alpha \frac{\Delta B}{B}. \quad (6)$$

Состояние плазмы в магнитной трубке характеризуется плазменным параметром β , равным отношению газового и магнитного давлений:

$$\beta = 2\mu k_B N_e (T_e + 0.9T_p) B^{-2},$$

где $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная проницаемость среды, $\text{Гн} \cdot \text{м}^{-1}$; k_B – постоянная Больцмана; N_e – количество электронов в единице объема, м^{-3} ; T_e и T_p – температура электронов и протонов соответственно [11, 12]. В импульсной фазе солнечной вспышки $T_e \gg T_p$ в течение времени выравнивания температур порядка $\tau_b \leq \frac{m_p}{m_e} \frac{1}{\nu_{ei}}$. Здесь m_p и m_e – масса протона и электрона соответственно, а ν_{ei} – эффективная частота соударений этих частиц. Во вспышечной области, для которой $T_e \approx 10^7$ К и $N_e \approx 10^{16}$ м^{-3} , эффективная частота соударений равна:

$$\nu_{ei} \approx 6.45 \cdot 10^{-5} \frac{N_e}{T_e^{3/2}}, \quad (7)$$

и значение τ_b может составлять величину порядка нескольких минут. Согласно [2, 6] в этом интервале времени увеличение электронного давления приводит к изменению магнитного поля на величину ΔB и плазменный параметр β принимает следующее значение:

$$\beta = 2\mu k_B N_e T_e B^{-2} \approx 2 \frac{\Delta B}{B}. \quad (8)$$

Оценка (8) с учетом (6) позволяет определить значение плазменного параметра β по глубине модуляции интенсивности излучения вспышечной области и оценочному значению спектрального индекса δ , характерного для рентгеновского класса наблюдаемой вспышки [13]:

$$\beta = \frac{M}{\alpha}. \quad (9)$$

Для случая резонанса МГД колебаний в магнитных трубках и возникновения стоячих изгибных колебаний свяжем пространственный период l_p изгибных колебаний с плазменными параметрами. Эти колебания видны на периферии вспышечной области в линии 195 Å, где они контрастируют с более холодной окружающей средой. Частота изгибных колебаний ω определяется альвеновской скоростью V_A и плотностью плазмы внутри и вне магнитной трубки. Поскольку плотность плазмы внутри трубки существенно превышает ее внешнее значение, изгибные колебания близки к резонансным колебаниям альвеновской волны внутри магнитной трубки.

Скорость альвеновской волны V_A связана с параметрами плазмы солнечной атмосферы следующим образом [11]:

$$V_A = B(\mu \tilde{m}_p \cdot 1.9 N_e)^{-0.5}, \quad (10)$$

где $\tilde{m} \approx 0.6$ – средняя масса на частицу в единицах m_p .

Вместе с тем альвеновская скорость независимо измеряется по пространственному периоду

изгибных колебаний стоячей волны l_p и временному периоду t , определяемому по динамическому спектру пульсаций излучения:

$$V_A = 2 \frac{l_p}{t}. \quad (11)$$

Заметим, что измерение l_p необходимо выполнять с учетом проекции магнитной петли на диск Солнца.

Формулы (8), (10) и (11) позволяют определить температуру $T = T_e$ вспышечной области:

$$T = C\beta \left(\frac{l_p}{t} \right)^2, \quad (12)$$

где $C = 2 \cdot 1.9 \tilde{m}_p k_B^{-1} = 2.76 \cdot 10^{-4}$.

Продольные МГД волны, модулирующие плотность потока излучения при распространении в магнитной трубке, испытывают затухание вследствие джоулевой диссипации, электронной теплопроводности, ионной вязкости и радиационного излучения. Расчеты показывают, что затухание продольных колебаний в магнитной трубке при типичных параметрах вспышечной плазмы определяется в основном электронной теплопроводностью [6]. Декремент этого затухания δ_m зависит от параметров плазмы и угла θ между волновым вектором и направлением магнитного поля следующим образом [14, 15]:

$$\delta_m = \frac{1}{3} \frac{m_p}{m_e} \frac{\omega^2}{v_{ei}} \beta^2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta. \quad (13)$$

С учетом (7) выражение (13) преобразуется к виду:

$$\delta_m \approx 1.29 \cdot 10^{-3} \frac{m_p}{m_e} \omega^2 \beta^2 N_e^{-1} T^{1.5} \sin^2 2\theta. \quad (14)$$

Вместе с тем декремент затухания δ_m определяется независимо по добротности Q и час-

тоте пульсаций ω потока излучения, равной частоте резонансных МГД колебаний:

$$\delta_m = \frac{\omega}{Q}. \quad (15)$$

Добротность резонатора при импульсном возбуждении измеряется по длительности колебаний τ на уровне $1/e$ от максимального значения и периоду колебаний пульсаций $t = 2\pi/\omega$ следующим образом:

$$Q = \pi \frac{\tau}{t}. \quad (16)$$

Из (15) с учетом (16) получим следующую связь δ_m с длительностью пульсаций излучения:

$$\delta_m = \frac{2}{\tau}. \quad (17)$$

Электронную концентрацию плазмы определим из выражения (14) с учетом (12) и (17):

$$N_e = F\beta^{3.5} \tau \frac{l_p^3}{t^5} \sin^2 2\theta, \quad (18)$$

где $F = 7.3 \cdot 10^3 \pi^2 \left(\frac{m_p}{m_e} \right) \left(\frac{1.9 \mu m_p}{k_B} \right)^{1.5} = 2.15 \cdot 10^2$.

Выражение для определения магнитного поля получим из (10) с учетом (11) и (18):

$$B = G\beta^{1.75} \tau^{0.5} \frac{l_p^{2.5}}{t^{3.5}} \sin 2\theta, \quad (19)$$

где $G = 5.35 \cdot 10^2 \left(1.9 \mu m_p \frac{m_p}{m_e} \left(\frac{1.9 \mu m_p}{k_B} \right)^{1.5} \right)^{0.5} = 1.43 \cdot 10^{-15}$.

Помимо продольных колебаний, в магнитной трубке могут существовать более высокочастотные поперечные МГД колебания, образующие стоячие волны с периодом t_r . Они также модулируют плотность потока гиротронного излучения, что позволяет измерить их период. Разрешающая способность спутниковых УФ телескопов не позволяет выделить пространственную структуру таких колебаний. Оценить малый радиус магнитных трубок можно по температуре плазмы T , полученной при исследовании продольных колебаний по измеренным значениям периода основной моды колебаний t_r . Используя формулы для поперечных колебаний в магнитных трубках [6], можно определить их малый радиус r :

$$r = 2.02 \cdot 10^3 t_r \left(T \frac{6 + 10\beta}{\beta} \right)^{0.5}. \quad (20)$$

Оценка линейного размера D вспышечной области вдоль нейтральной линии определяет количество элементарных трубок n в их аркаде:

$$n = \frac{D}{2r}.$$

Анализ параметров больших вспышек рентгеновского класса М

На радиотелескопе РТ-2 [9], работающем на длине волны 3.4 мм с диаграммой направленности (ДН) шириной 7.5 угловых минут в различные периоды солнечной активности были зарегистрированы две большие солнечные вспышки. Первая импульсная вспышка класса М8.2 была зарегистрирована в период высокой солнечной активности в активной области NOAA9893 10.04.2002 г. с началом в 12:27:30 UT. Вторая вспышка класса М6.1 была зафиксирована в период минимума солнечной активности в активной области NOAA0808 12.09.2005 г. с началом в 08:44 UT. Запись изменения плотности потока излучения во время вспышки М8.2

в относительных единицах в течение первых 64 мин относительно времени 12:23 UT приведена на рис. 1. Наблюдения вспышки выполнялись в условиях периодического появления атмосферной облачности. Это приводило к кратковременным падениям регистрируемой интенсивности излучения в моменты времени, соответствующие 10, 22, 26 и 58 минутам записи.

Условия возникновения вспышки класса M8.2 были проанализированы по данным магнитограмм этого дня для времени 04:48 UT и 12:48 UT, которые приведены на рис. 2, а и 2, б. Динамика структуры фотосферных магнитных полей активной области NOAA9893 в этот период характеризуется таким процессом вихревого движения фотосферной плазмы с замороженным магнитным полем, который обычно приводит к возникновению солнечных вспышек [16]. В результате вихревого движения плазмы нейтральная линия между сильными разнополярными магнитными полями приобрела сигмоидный вид, характерный для топологии магнитного поля перед большими вспышками. Основания расположенных над ней аркады магнитных трубок сближались со скоростями порядка 100 м/с. Это сближение привело к накоплению избыточного магнитного поля и импульсному пересоединению магнитных силовых линий в плазменном высокотемпературном слое, расположенном вдоль вершин аркады магнитных трубок, и к возникновению мощной компактной вспышки. Центр этой вспышки, определенный по ее изображению в линии 195 Å, полученному УФ телескопом TRACE, показанный на рис. 2, б

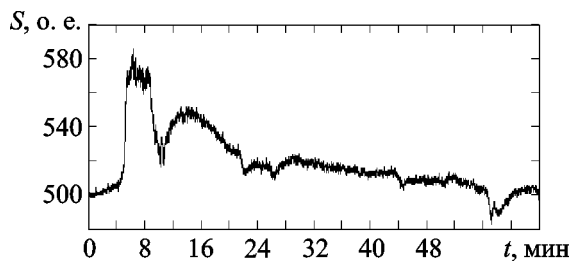


Рис. 1. Интенсивность излучения в относительных единицах вспышки M8.2, зарегистрированной 10.04.2002 г. Начало записи в 12:23 UT

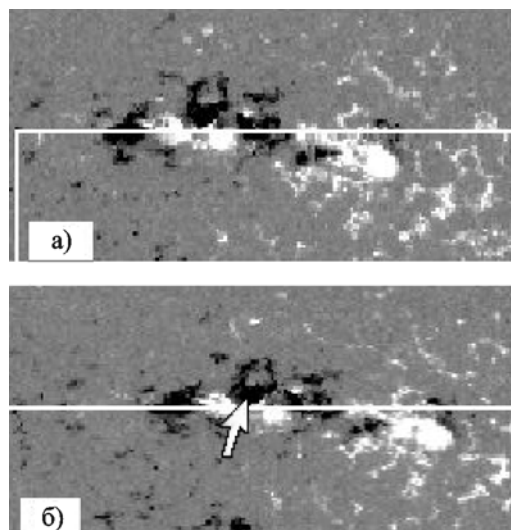


Рис. 2. Магнитограммы области NOAA9893 10.04.2002 г.: а) — для 04:48 UT; б) — для 12:48 UT. Стрелка — центр вспышки

стрелкой, расположен над нейтральной линией. Изображение вспышечной области достаточно стабильно в течение длительного времени и по имеющимся данным в 12:36 UT и 12:48 UT практически совпадают. Для измерения структурных параметров вспышечной области, представленной на рис. 3, а, было проведено оконтуривание интенсивности ее излучения. Полученное изображение активной области показано на рис. 3, б. Здесь центральный контур соответствует размеру вспышечной области $0.7' \times 1.1'$. Боковые грани этой области практически параллельны аркаде вспыхнувших магнитных трубок и имеют волнообразную структуру, связанную с изгибными колебаниями магнитных трубок за счет распространения и резонанса в них МГД волн, близких по скорости к альвеновским волнам. Колебания левой границы менее выражены и имеют почти в 2 раза более короткий пространственный период в сравнении с колебаниями правой границы. Это вероятно связано с возбуждением в магнитных трубках этой области более высоких мод собственных колебаний. Анализ параметров колебаний правой боковой границы вспышечной области проведен с учетом того, что наблюдаемое изображение является

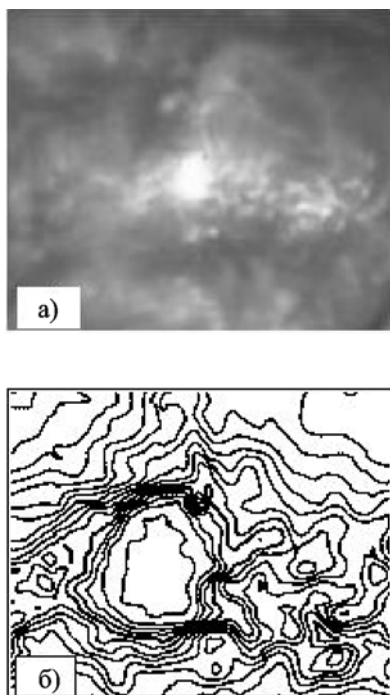


Рис. 3. Излучение области вспышки M8.2 в линии 195 \AA 10.04.2002 г. в 12:13 UT: а) – тональное изображение; б) – увеличенное оконтурненное изображение

проекцией на солнечный диск процессов, происходящих на его сферической поверхности. Центр вспышечной области лежит выше центра солнечного диска на $7.1'$ и левее центрального меридиана на $19''$. С учетом этих координат получено, что длина волны основной моды МГД колебаний магнитной трубки равна $l_p \approx 2.1 \cdot 10^7$ м.

В импульсной фазе вспышки наблюдается достаточно глубокая модуляция излучения. Поскольку яркостная температура вспышечной области на несколько порядков превышает ее температуру в предвспышечном состоянии, глубину модуляции можно измерять относительно исходного уровня активной области. В процессе вспышки излучение формирует аркада элементарных магнитных трубок, в которых могут существовать различные моды МГД колебаний. Поэтому динамический спектр пульсаций излучения должен иметь сложный характер. Выделение этого спектра и его интерпретация является нетривиальной задачей.

Существует большое количество различных методов анализа временных рядов. Многие из них использовались при анализе записи вспышки класса M8.2 с целью выделения частот пульсаций, их основной моды, измерения их добротности, определения других частотно-временных параметров. Оптимальными методами анализа являются методы, использующие априорную информацию о структуре сигнала. Однако в нашем случае известны только время начала вспышки и время покрытия сигнала облачностью атмосферы. Эта информация использовалась при предварительной обработке временного ряда, при которой устранялся его тренд. Параметры этой процедуры выбирались таким образом, чтобы в выходном сигнале подавлялись колебания, возникающие при аппроксимации больших градиентов интенсивности сигнала в начальный момент вспышек и в период резкого ослабления сигнала наплывающей облачностью. В дальнейшем полученный сигнал анализировался методом фурье-анализа со скользящим окном, размер и форма которого оптимизировались в соответствии с требованиями повышения точности частотно-временного анализа.

Спектрограмма динамического спектра пульсаций в диапазоне частот $0.02 \div 0.5$ Гц приведена на рис. 4, а. Из анализа спектрограмм необходимо исключить две частоты, равные 0.2 и 0.12 Гц, которые являются результатом дискретного управления ДН радиотелескопа при сопровождении вспышечной области. Угловые флуктуации ошибок управления ДН по прямому восхождению, определяемые дискретностью датчика углов, равной $0.7'$, приводят к модуляции принимаемого сигнала с указанными частотами.

В импульсной фазе вспышки наблюдается достаточно широкий спектр пульсаций, имеющих вид коротких цугов, что говорит об их невысокой добротности. Проанализируем параметры сигнала вспышки в момент ее максимума в интервале времени $5.7 \div 6.7$ мин относительно начала записи, свободном от переходных процессов и воздействия облачности. Полученная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) пульсаций в этом временном

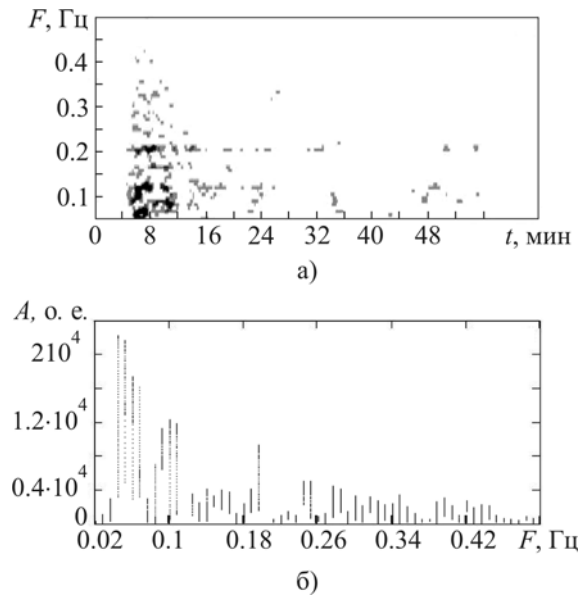


Рис. 4. Спектрограмма флуктуаций излучения вспышки M8.2 10.04.2002 г., начало записи 12:23 UT, (а); АЧХ пульсаций излучения вспышки M8.2 на временном интервале 12:27:42 UT \pm 0.5 мин (б)

интервале приведена на рис. 4, б. На рисунке устранены обе паразитные частоты. Полученный график демонстрирует основную моду колебаний, имеющую максимальную амплитуду, и ее гармонические составляющие. Измерение основной моды дает частоту пульсаций, равную 0.05 Гц, что соответствует периоду колебаний $t \approx 20$ с. Длительность пульсаций основной моды $\tau \approx 70$ с. Помимо частоты основной моды колебаний, на других временных интервалах была выделена более высокая частота пульсаций порядка 0.49 Гц, которая отождествляется с основной модой радиальных колебаний. Ее период равен $t_r \approx 2$ с.

Измеренная глубина модуляции сигнала в анализируемом временном интервале равна 0.31. Если принять, что индекс энергетического спектра ускоренных электронов во время вспышки равен $\delta = 4$ [13], а средний угол $\theta \approx 30^\circ$, то в соответствии с (9), (12), (18) и (19) имеем следующие оценки параметров плазмы во вспышечной области: $\beta \approx 0.14$, $T \approx 4.2 \cdot 10^7$ К, $N_e \approx 3.3 \cdot 10^{16}$ м⁻³, $B \approx 1.9 \cdot 10^{-2}$ Тл. В соответствии с (20) рассчитан малый радиус магнитной трубки в аркаде. Его размер равен

$r \approx 1.7 \cdot 10^6$ м. Исходя из общего линейного размера вспыхнувшей области по нейтральной линии между разнополярными магнитными полями можно определить, что ее структура образована 10 элементарными магнитными трубками.

В отличие от вспышки класса M8.2, зарегистрированной 10.04.2002 г. и возникшей в процессе мгновенного пересоединения в аркаде магнитных трубок, вспышка класса M6.1, наблюдавшаяся 12.09.2005 г., представляла собой длительный процесс развития простых петельных вспышек в областях, не связанных единой аркадой. Картина развития этой вспышки хорошо видна в серии изображений этой активной области в линии 195 Å, полученной УФ телескопом TRACE с минимальным временем смены изображений 6 с. В начальном периоде вспышки происходил практически одновременный нагрев трех структурно независимых элементарных магнитных трубок. В изображении, приведенном на рис. 5, а они отмечены цифрами 1, 2, 3. Эти трубки лежат в стороне от основных по интенсивности разнополярных полей фотосферы, приведенных на рис. 5, б, где область их максимального градиента отмечена стрелкой. В указанных магнитных петлях наблюдается внутренняя пространственная модуляция яркости, вызванная модуляцией плотности плазмы стоячими МГД волнами. При этом происходило быстрое, за время менее 6 с, изменение пространственной структуры модуляции яркости, связанной с изменением параметров плазмы. В процессе развития вспышки в 08:46:29 UT указанные структуры образовали слитную широкую вспышечную область, которая после 09:04:47 UT снова разделилась на три независимые вспышечные области. В дальнейшем первая область переместилась в район максимального градиента магнитного поля, вызвав вспышечный нагрев существовавшей там аркады магнитных трубок. В период с 08:46:29 UT по 08:56:46 UT левая сторона второй вспышечной области, приведенной на рис. 5, в, имела волнообразный вид, связанный с изгибными колебаниями граничных магнитных трубок. В указанное время форма этих колебаний изменчива, но пространственный период стабилен, что сви-

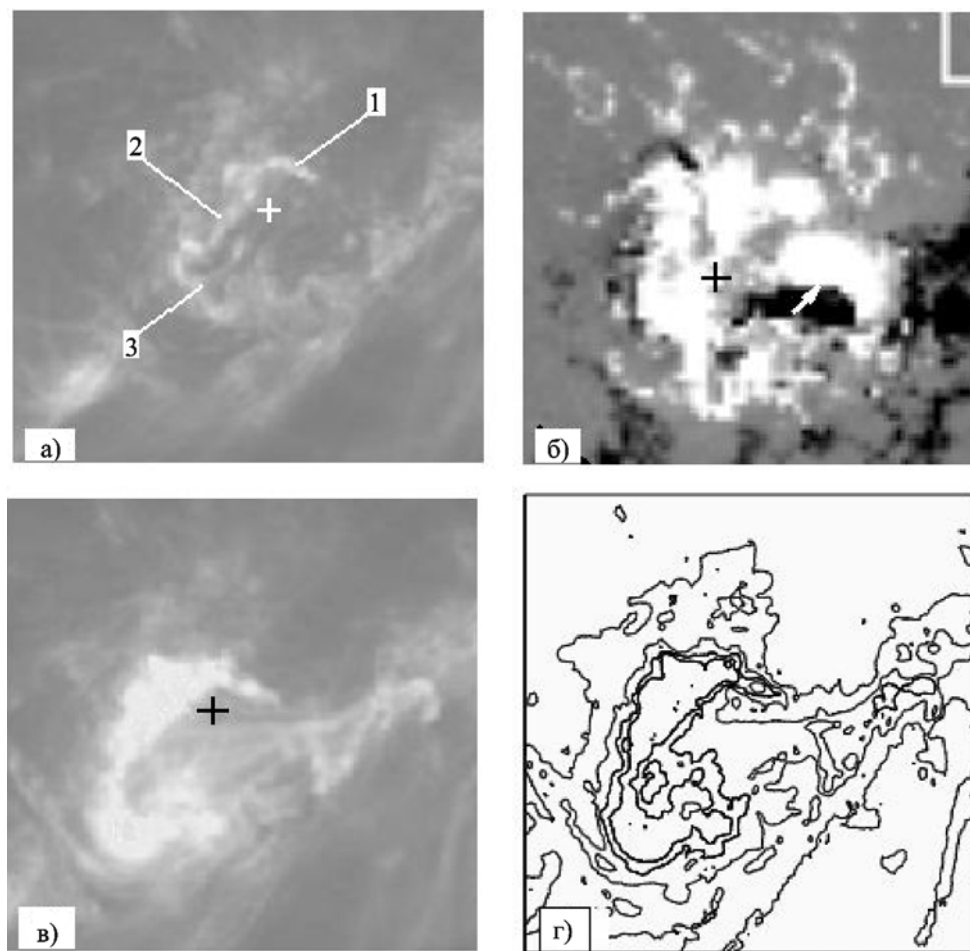


Рис. 5. Изображение области NOAA0808 в линии 195 Å 12.09.2005 г. в 08:44:44 UT (а); магнитограмма данной области в 12:53 UT, стрелка – район максимального градиента поля, (б); изображение вспышки M6.1 в 08:55:46 UT (в); контурное изображение вспышки в 08:55:46 UT (г)

детельствует о стабильности в данный период времени параметров плазмы этой области. Контурное изображение активной области в 08:55:46 UT приведено на рис. 5, г. Измерение периода колебаний в этой области с учетом искажений, вызванных проекцией изображения на картинную плоскость, перпендикулярную лучу зрения, дает значение $l_p \approx 1.4 \cdot 10^7$ м. Для определения параметров плазмы в этот момент времени проведен анализ данных наблюдения вспышки на телескопе РТ-2. Вид записи вспыхивающего излучения на частоте 84 ГГц в относительных единицах с началом в 08:48:12 UT приведен на рис. 6, а. Отметим, что уровень излучения активной области NOAA0808 в предвспыхивающий период соответ-

ствовал 363 о. е. Спектральный анализ записи этой вспышки выполнен аналогично анализу вспышки класса M8.2. Полученная спектрограмма для диапазона 0.05 ÷ 0.5 Гц показана на рис. 6, б. Интенсивность всплесков приведена для четырех уровней градаций, что дает контрастную картину появления пульсаций. Многокомпонентная структура вспыхивающей области предопределила сложную частотно-временную структуру пульсаций. Помимо частот пульсаций вспыхивающего излучения, на данной спектрограмме присутствуют три паразитных частоты, равные 0.13, 0.23 и 0.36 Гц, которые связаны с дискретностью управления ДН радиотелескопа при слежении за вспыхивающей областью с координатами $-7'$ по пря-

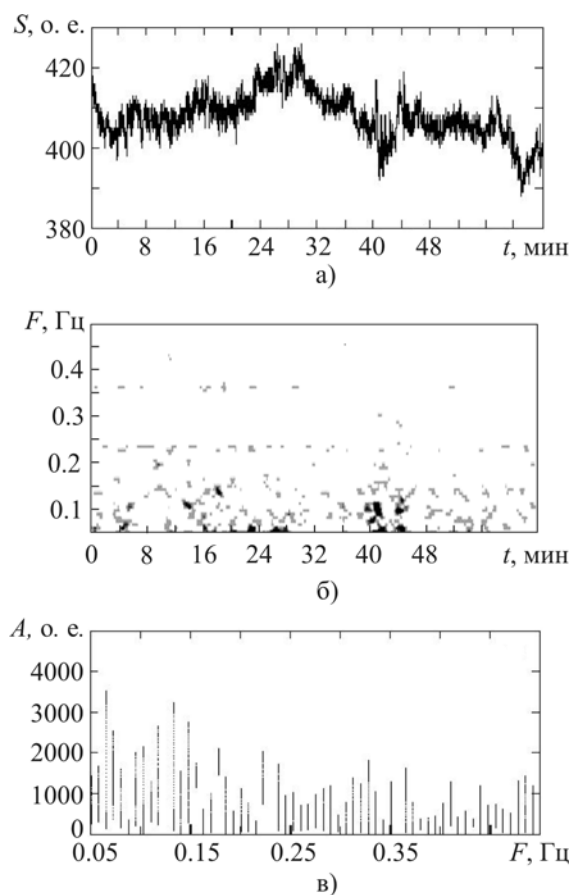


Рис. 6. Интенсивность излучения вспышки M6.1 12.09.2005г., начало записи в 08:48:12 UT, (а); спектрограмма флуктуаций излучения вспышки M6.1 12.09.2005 г. с началом в 08:48:12 UT (б); АЧХ пульсаций излучения вспышки M6.1 на временном интервале 08:55:42 UT ± 1мин (в)

тому восхождению и $-5'$ по склонению относительно центра Солнца. При слежении за источником с такими координатами, помимо модуляции излучения вспышечной области главным лепестком ДН антенны, возникает

модуляция потока излучения спокойного Солнца боковыми лепестками антенны, находящимися на его лимбе. Для определения частоты пульсации, связанной с выделенными изгибными колебаниями магнитных трубок, рассчитана АЧХ пульсаций для временного интервала 08:55:12 – 08:56:12 UT, которая показана на рис. 6, в. На этом рисунке отфильтрованы паразитные частоты. Анализ АЧХ позволил выделить наиболее интенсивную основную моду продольных МГД колебаний с частотой $f_1 = 0.07$ Гц и периодом $t = 14.3$ с, ее вторую и третью гармоники. Кроме того, на диаграмме присутствует менее интенсивная частота $f_2 = 0.12$ Гц, ее вторая и третья гармоники, а также частота $f_3 = 0.18$ Гц и ее вторая гармоника. Частоты f_1 , f_2 и f_3 мы отождествляем с основными модами продольных МГД колебаний в трех основных активных образованиях. Более высокие выделяемые частоты $f_4 = 0.33$ Гц и $f_5 = 0.48$ Гц мы отождествляем с радиальными колебаниями магнитных трубок. Пульсации с частотой f_1 , отождествленной с основной модой продольных колебаний второй активной области, для которой определены значения пространственного периода, имеют длительность $t \approx 40$ с. В этот период глубина модуляции интенсивности излучения равна 0.24. Полученные значения позволили оценить параметры плазмы рассматриваемой активной области следующим образом: $\beta \approx 0.11$, $T \approx 2.8 \cdot 10^7$ К, $N_e \approx 1.7 \cdot 10^{16}$ м⁻³, $B \approx 1.1 \cdot 10^{-2}$ Тл. При этом возможные значения радиусов магнитных трубок лежат в пределах $1 \cdot 10^6 \div 1.4 \cdot 10^6$ м.

Для сравнения выделенные параметры двух мощных близких по интенсивности вспышек M8.2 и M6.1 сведены в таблицу, в которой L – средняя длина магнитной петли.

Таблица. Параметры вспышек M8.2 и M6.1

Класс вспышки	Дата	T, К	$N_e, \text{м}^{-3}$	B, Тл	β	Структура области		
						L, м	r, м	n
M8.2	10.04.2002	$4.2 \cdot 10^7$	$3.3 \cdot 10^{16}$	$1.9 \cdot 10^{-2}$	0.14	$126 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^6$	10
M6.1	12.09.2005	$2.8 \cdot 10^7$	$1.7 \cdot 10^{16}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$	0.11	–	–	–

Заключение

В представленной работе проведено развитие метода диагностики вспышечной плазмы с целью повышения точности оценки ее параметров по данным излучения в мм диапазоне. Для этого диапазона уточнена количественная связь флуктуации плотности потока гиротронного механизма излучений с флуктуациями магнитного поля. Для оценки параметров резонансных МГД колебаний в корональных магнитных трубках предложено использовать пространственный период их изгибных колебаний, который наиболее точно определяется по изображениям в линии излучения 195 \AA . Рассмотренное излучение двух мощных солнечных вспышек в 3-мм диапазоне в импульсной фазе сопровождалось высоким уровнем модуляции, достигающим 30 %. Такой уровень модуляции свидетельствует о высокой степени флуктуаций магнитного поля в корональных трубках, которые вызываются распространением в них МГД колебаний с образованием стоячих волн. Эти стоячие волны наблюдались в изображениях вспышечных областей в линии 195 \AA в виде изгибных колебаний периферийных магнитных трубок. Частоты пульсаций излучения, выделенные в динамических спектрах излучения вспышек, связаны с распространением ускоренных нетепловых электронов вдоль модулированного магнитного поля и определяются пространственным периодом стоячих волн. Глубина модуляции, частота пульсаций излучения, пространственный период стоячих волн при учете типичного значения спектрального индекса ускоренных нетепловых электронов позволили оценить температуру плазмы в импульсной фазе вспышки. Определение длительности пульсаций, связанных с затуханием колебаний, с учетом приведенных выше параметров позволило оценить концентрацию вспышечной плазмы и величину магнитного поля. Полученные результаты не противоречат оценке параметров плазмы в других солнечных вспышках, выполненной по наблюдениям в микроволновом диапазоне [6, 7].

Литература

1. Nakariakov V. M. and Ofman L. Determination of the Coronal Magnetic Field by Coronal Loop Oscillations // *Astron. Astrophys.* – 2001. – Vol. 372. – P. L53-L56.
2. Зайцев В. В., Степанов А. В. О происхождении пульсаций жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек // *Письма в АЖ.* – 1982. – Т. 8, №4. – С. 248-252.
3. Зайцев В. В., Кисляков А. Г., Степанов А. В., Урпо С., Шкелев Е. И. Низкочастотные пульсации корональных магнитных петель // *Известия вузов. Радиофизика.* – 2001. – Т. XLIV, №1-2. – С. 38-56.
4. Гельфрейх Г. Б., Цап Ю. Т., Копылова Ю. Г., Гольдварг Т. Б., Наговицын Ю. А., Цветков Л. И. О вариациях микроволнового излучения активных областей солнечной атмосферы // *Письма в АЖ.* – 2004. – Т. 30, №7. – С. 540-547.
5. Зайцев В. В., Кисляков А. Г., Урпо С., Степанов А. В., Шкелев Е. И. Солнечно-временная эволюция низкочастотных пульсаций в микроволновом излучении солнечных вспышек // *АЖ.* – 2003. – Т. 80, №10. – С. 945-955.
6. Степанов А. В., Копылова Ю. Г., Цап Ю. Т., Шибасаки К., Мельников В. Ф., Гольдварг Т. Б. Пульсации микроволнового излучения и диагностика вспышечной плазмы // *Письма в АЖ.* – 2004. – Т. 30, №7. – С. 530-539.
7. Копылова Ю. Г., Степанов А. В., Цап Ю. Т. Радиальные колебания корональных петель и микроволновое излучение солнечных вспышек // *Письма в АЖ.* – 2002. – Т. 8, №11. – С. 870-879.
8. Kundu M. R., White S. M., Shibasaki K. and Sakurai T. Nonthermal Flare Emission from MeV – Energy Electron at 17, 34, and 86 GHz // *Astrophys. J.* – 2000. – Vol. 545. – P. 1084-1088.
9. Karelin Yu. V., Litvinenko L. N., Ruzhentsev N. V., Sulima V. S., Churilov V. P. Radio Telescope RT-2 for 3-mm Band // *Turkish Journal of Physics.* – 1994. – Vol. 9. – P. 1038-1040.
10. Dulk G. A., March K. A. Simplified Expressions for the Gyrosynchrotron Radiation from Mildly Relativistic Nonthermal and Thermal Electrons // *Astrophys. J.* – 1982. – Vol. 259. – P. 350-358.
11. Прист Э. П. Солнечная магнитогидродинамика. – М.: Мир, 1985. – 589 с.
12. Benz A. Plasma Astrophysics Kinetic Processes in Solar and Stellar Coronae – *Astrophysics and Space Science Library.* – 2002. – Vol. 279. – 328 p.
13. Simnett G. M. The Electron Energy Spectrum from Large Solar Flares // *Sol. Phys.* – 2006. – Vol. 237. – P. 383-395.
14. Брагинский С. И. Явления переноса в плазме // *Вопросы теории плазмы.* – 1963. – Вып. 1. – С. 183-272.
15. Tsap Yu. T. On the Cascading Acceleration of the Quasi-Thermal Electrons by MHD Turbulence in Solar Flares // *Sol. Phys.* – 2000. – Vol. 194. – P. 131-136.
16. Сомов Б. В. Современное состояние проблемы солнечных вспышек: новые наблюдения и новые модели // *Астрономический вестник.* – 2006. – Т. 40, №2. – С. 99-107.

**Дослідження параметрів сонячних
спалахів у триміліметровому
діапазоні хвиль**

**О. В. Антонов, Ю. М. Герасимов,
Ю. В. Карелін**

Розглянуто два потужні сонячні спалахи рентгенівського класу M8.2 і M6.1, спостережені 10.04.2002 р. і 12.09.2005 р. в період максимуму та мінімуму сонячної активності. Досліджено динамічні спектри випромінювання спалахів у 3-мм діапазоні, зареєстрованих на радіотелескопі РТ-2. На підставі виявлених у зображеннях області спалаху в лінії 195 Å згинальних коливань магнітних трубок і даних динамічного спектру оцінено параметри плазми у області спалаху. Оцінено геометричні розміри елементарних магнітних трубок і їхню чисельність в аркаді для спалаху класу M8.2.

**Research of Parameters
of Solar Flares
at 3-mm Wavelengths**

**A. V. Antonov, Yu. M. Gerasimov,
and Yu. V. Karelin**

Two powerful solar flares of x-ray class M8.2 from 10.04.2002 and M6.1 from 12.09.2005 recorded, accordingly, during maximum and minimum solar activity. The dynamic spectrum of radiation of 3-mm wavelength flares recorded with the RT-2 radio telescope has been studied. The flexural vibrations of magnetic tubes found in the images of a flare region in the line 195 Å and the dynamic spectrum data have allowed estimation of the parameters of plasma of the flare region. The geometrical dimension of the elementary magnetic tubes and their number in an arcade for a flare of class M8.2 are estimated too.