

В. Ю. Шустиков, А. В. Шумов, В. С. Рыжов,
А. В. Жильцов

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ МИЛЛИМЕТРОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ RT-7,5 МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

Рассмотрены результаты регистрации на радиотелескопе RT-7,5 МГТУ им. Н.Э. Баумана радиоизлучения на частотах 93,2 и 139,8 ГГц от двух солнечных вспышек. Описана методика наблюдений и особенности полученных данных. Выполнено их сопоставление с данными наблюдений этих событий на других наземных и космических обсерваториях. На основе теоретических представлений о физических процессах, происходящих во вспышках, сделаны оценки температуры плазмы во вспышечных магнитных петлях.

E-mail: rt75shust@mail.ru, shum_ov@mail.ru, v_ryzhov@mail.ru, zhiltsov_bmstu@mail.ru

Ключевые слова: радиотелескоп, радиоизлучение, миллиметровый диапазон, Солнце, солнечные вспышки, плазма.

На радиотелескопе RT-7,5 МГТУ им. Н.Э. Баумана на протяжении нескольких десятилетий ведутся систематические наблюдения Солнца в миллиметровом диапазоне длин волн. При организации этих наблюдений учитывалась фаза цикла солнечной активности и технические возможности системы. В последние годы были разработаны специальные методики наблюдений и реализующие их программные модули, позволяющие регистрировать нестационарное радиоизлучение от активных областей в непрерывном режиме. Таким образом, достигнута возможность получения экспериментальных данных, содержащих информацию о динамике физических процессов, происходящих во вспышечных активных областях.

Интерес исследователей к нестационарному миллиметровому радиоизлучению вспышек обусловлен следующими причинами. Основными механизмами его генерации являются гирোসинхротронное излучение ускоренных до энергий 0,5...100 МэВ электронов и тормозное излучение нагретой до 10^4 ... 10^6 К относительно плотной плазмы вспышечных магнитных петель. Вопросы о механизме ускорения значительного числа электронов и источнике энергии, необходимой для нагрева плазмы, являются в настоящее время ключевыми в физике солнечных вспышек. Кроме того, недавние наблюдения

субмиллиметрового излучения вспышек на частотах 212 и 405 ГГц, показали неожиданный вид спектра в этом диапазоне с возрастанием интенсивности на более высоких частотах [1], что требует либо присутствия других механизмов генерации излучения, либо необычных параметров плазмы в источнике. В связи с этим данные наблюдений на частотах 93,2 и 139,8 ГГц имеют высокую значимость, так как они несут информацию о малоизученной области спектра.

Однако получение достоверных и качественных данных наблюдений вспышечного миллиметрового радиоизлучения является непростой задачей. Это обусловлено тем, что из-за высоких требований к точности отражающей поверхности зеркала антенны в этом диапазоне работает лишь небольшое количество радиотелескопов. При этом на немногих из них реализуются программы систематических солнечных наблюдений, необходимые для регистрации излучения таких относительно редких и кратковременных событий, как вспышки. Кроме того в данном диапазоне значительное влияние на качество экспериментальных данных оказывает атмосфера Земли и погодные условия. Фактически на различных инструментах было получено относительно небольшое количество данных наблюдений вспышечного радиоизлучения на частотах, близких к 93,2 ГГц, а на частоте 139,8 ГГц такие наблюдения не проводились совсем. По этим причинам полученные на радиотелескопе РТ-7,5 данные являются уникальными и имеют высокую ценность.

Методика наблюдений. В настоящее время на радиотелескопе РТ-7,5 для солнечных наблюдений используется двухдиапазонный приемник с частотами гетеродинов $\nu_1 = 93,2$ ГГц и $\nu_2 = 139,8$ ГГц (длины волн 3,2 и 2,2 мм соответственно). Фактическая ширина диаграммы направленности антенны для этих частот составляет $\theta_D \approx \approx 3$ угл. мин, точность наведения на источник 10...20 угл. с.

Такие характеристики радиотелескопа позволяют проводить наблюдения в двух режимах: двумерное сканирование Солнца лучом антенны, при котором получается карта распределения яркостной температуры радиоизлучения по солнечному диску; длительное сопровождение выделенной активной области и непрерывная запись сигнала от нее.

Пространственное разрешение получаемых карт позволяет определять положение активных областей на диске и их усредненную яркостную температуру, однако его недостаточно для выделения мелкомасштабных структурных элементов хромосферной сетки и вспышечных магнитных петель. Кроме того время построения одной карты составляет 8 мин, а длительность импульсных вспышек — в среднем 1...5 мин. Несмотря на то, что на картах удалось зарегистри-

ровать несколько вспышек, детальный анализ этих данных не проводился из-за их низкой информативности.

Для регистрации изменения потока радиоизлучения на всех фазах вспышки использовался режим сопровождения отдельной активной области. Ширина диаграммы направленности $\theta_D = 3$ угл. мин сопоставима с размерами средних активных областей, а размеры источника импульсной вспышки как правило лежат в пределах $10 \dots 40$ угл. с, поэтому можно считать, что в таком режиме принимается практически весь поток радиоизлучения вспышки. Запись отсчетов радиометра производится с шагом по времени $0,125$ с, однако фактическое временное разрешение составляет около 1 с из-за влияния шумов приемника и земной атмосферы.

Сигнал S , регистрируемый радиотелескопом, связан со спектральной плотностью потока радиоизлучения F линейной зависимостью

$$S = aF + b,$$

где a и b — калибровочные коэффициенты, зависящие от технических параметров приемника. В режиме сопровождения активной области калибровка производилась следующим образом. Через некоторые интервалы времени, в течение которых коэффициент поглощения радиоизлучения в земной атмосфере значительно не изменялся, записывался сигнал от центра солнечного диска и от участка неба на том же зенитном угле. Выражения для значений этих сигналов, а также сигнала от вспышки имеют вид

$$S_{\text{Sky}} = aF_{\text{Sky}} + b; \quad (1)$$

$$S_{\text{Sun}} = a(F_{\text{Sky}} + F_{\text{Sun}}) + b; \quad (2)$$

$$S_{\text{Flare}} = a(F_{\text{Sky}} + F_{\text{Sun}} + F_{\text{Flare}}) + b. \quad (3)$$

Вычитая из (2) выражение (1) и из (3) выражение (2), получим

$$\Delta S_{SS} = S_{\text{Sun}} - S_{\text{Sky}} = aF_{\text{Sun}}; \quad (4)$$

$$\Delta S_{FS} = S_{\text{Flare}} - S_{\text{Sun}} = aF_{\text{Flare}}. \quad (5)$$

Затем, разделив (5) на (4), находим

$$\frac{\Delta S_{FS}}{\Delta S_{SS}} = \frac{F_{\text{Flare}}}{F_{\text{Sun}}}.$$

Таким образом, измерив сигнал от участка неба, центра Солнца и вспышки, можно выразить спектральную плотность потока вспышечного радиоизлучения в процентах от уровня спокойного Солнца. Для того чтобы выразить ее в общепринятых физических единицах — солнечных единицах потока ($1 \text{ с. е. п.} = 10^{-22} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \text{ Гц}^{-1}$) необходимо рассчитать $F_{\text{Sun}}(\nu)$ для рабочих частот по формуле

$$F_{\text{Sun}}(\nu) = \frac{2k\nu^2 T_{b\text{Sun}}(\nu)}{c^2} \cdot 8,46 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{4}{\pi} \theta_D^2, \quad (6)$$

где $T_{b\text{Sun}}(\nu)$ — яркостная температура центра диска спокойного Солнца. В литературе по этой тематике [2] приводятся следующие значения: $T_{b\text{Sun}}(93,2) = 6\,600 \text{ К}$, $T_{b\text{Sun}}(139,8) = 6400 \text{ К}$. Тогда при ширине диаграммы направленности $\theta_D = 3$ угл. мин для обеих частот получим следующие значения спектральной плотности потока спокойного Солнца:

$$F_{\text{Sun}}(93,2) = 172,5 \text{ с. е. п.};$$

$$F_{\text{Sun}}(139,8) = 354,1 \text{ с. е. п.}$$

Наблюдения. *Вспышка 04.07.2012.* Данная вспышка началась в 9:47 UT, достигла максимума в 9:55 UT, а окончилась в 9:57 UT. Она наблюдалась в активной области NOAA 11515 и имела рентгеновский класс M5,3. На радиотелескопе РТ-7,5 не удалось зарегистрировать начальную стадию вспышки, однако импульсная фаза была зарегистрирована полностью.

На рисунке 1 представлены изменения во времени вспышечного радиоизлучения на рабочих частотах. Максимальное значение спектральной плотности потока на частоте 93,2 ГГц составило 23,7 с. е. п., а на частоте 139,8 ГГц — 44,5 с. е. п., что соответствует повышению относительно уровня спокойного Солнца на 16 и 12,6 % соответственно.

Это же событие наблюдалось на другом радиотелескопе-антенне диаметром 1,8 м, принимающей полный поток от Солнца на частоте 11,2 ГГц, расположенной в обсерватории Метсахови (Финляндия). На рисунке 2 изображены треки вспышечного радиоизлучения на частотах 11,2, 93,2 и 139,8 ГГц. На фазе максимума вспышки в записи сигнала на всех трех частотах заметны пульсации, причем между ними просматривается четкая корреляция во времени.

При сравнительном анализе рассматривались также данные рентгеновского излучения. В настоящее время полный поток мягкого рентгеновского излучения в диапазоне длин волн $1 \dots 8 \text{ \AA}$ непрерывно регистрируется на космическом спутнике GOES-15. Временной ход изменения потока мягкого рентгеновского излучения во время импульсной фазы вспышки был плавным и более продолжительным, чем всплеск радиоизлучения, а максимальные значения сигнала в этих диапазонах были достигнуты почти в одно и то же время (рис. 3).

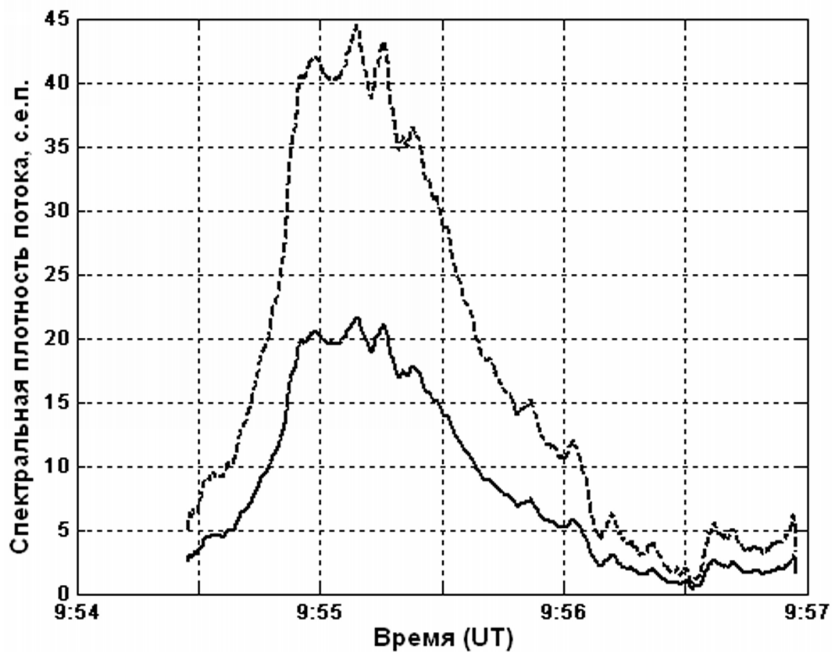


Рис. 1. Зависимость спектральной плотности потока радиоизлучения на частотах 93,2 ГГц (—) и 139,8 ГГц (---) от времени. Вспышка 04.07.2012

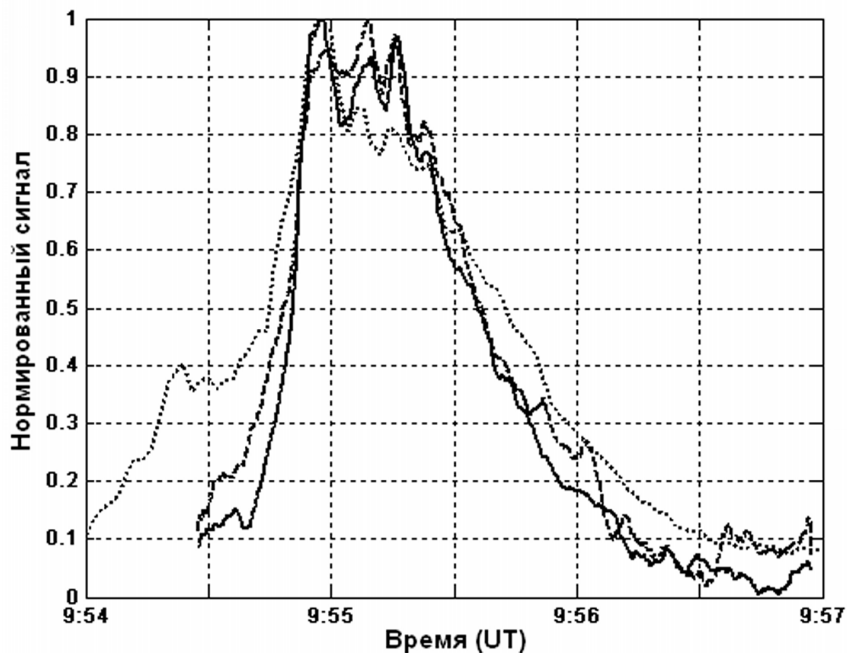


Рис. 2. Зависимость нормированного сигнала радиоизлучения на частотах 11,2 ГГц (.....), 93,2 ГГц (—) и 139,8 ГГц (- - -) от времени. Вспышка 04.07.2012

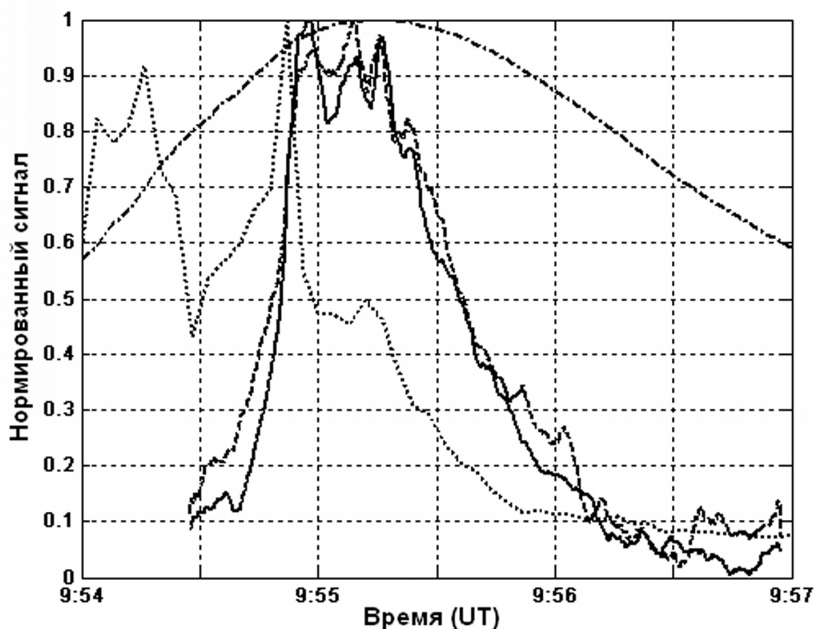


Рис. 3. Зависимость нормированного сигнала радиоионизации на частотах 93,2 ГГц (—) и 139,8 ГГц (---), мягкого рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 1-8 Å (.....) и жесткого рентгеновского излучения в диапазоне энергии квантов 25...50 кэВ (— · —) от времени. Вспышка 04.07.2012

Жесткое рентгеновское излучение в нескольких энергетических каналах регистрируется на космическом спутнике RHESSI. По этим данным можно построить мгновенные спектры рентгеновского излучения и рассчитать соответствующие спектральные индексы. На рисунке 3 представлено изменение во времени излучения в самом высокоэнергичном канале (25...50 кэВ), для которого было заметно повышение сигнала от вспышки. Главный пик в нем был достигнут на несколько секунд раньше, чем в миллиметровом радиоионизации, а спад был более резким.

Морфология вспышки и ее эволюция во времени хорошо просматриваются в изображениях вспышечной области в линии железа Fe 171 Å, полученных на космической обсерватории Solar Dynamics Observatory (SDO). Несколько таких изображений, сделанных на разных фазах вспышки, показаны на рис. 4. На рис. 4, а до начала вспышки заметна группа низколежащих магнитных петель и небольшое уярчение в области их сближения. Эта деталь сохранялась и на других изображениях, сделанных до вспышки, в течение нескольких десятков минут. Затем она резко сдвинулась влево, после чего появились две области повышенной яркости, между которыми образовалась вспышечная магнитная петля (рис. 4, б). Далее в 9:53:36 (UT) в центре этой петли наблюдалась область с максимальной яр-

костью в этой спектральной линии (рис. 4, в). Это время соответствует началу вспышки в миллиметровом диапазоне. В 9:55:26 во время фазы максимума в этом диапазоне наблюдался масштабный подъем плазмы из хромосферы в корону (рис. 4, з), а в 9:57:50 на фазе спада — дальнейшее движение и расширение плазмы вдоль магнитного поля (рис. 4, д).

Вспышка 05.07.2012. Начало этой вспышки зарегистрировано в 11:39 UT, максимум был достигнут в 11:44 UT, а окончание — в 11:50 UT. Так же, как и предыдущая, эта вспышка произошла в активной области NOAA 11515 и имела рентгеновский класс M6.1, по своей морфологии была подобна вспышке 4 июля.

На рисунке 5 представлено изменение спектральной плотности потока вспышечного радиоизлучения, полученное на радиотелескопе РТ-7,5. Максимальное значение спектральной плотности потока на частоте 93,2 ГГц составило 38,2 с. е. п., а на частоте 139,8 ГГц — 77,5 с. е. п., что соответствует повышению относительно уровня спокойного Солнца на 23,2 и 21,6 % соответственно.

Сопоставление с данными радиоизлучения на частоте 11,2 ГГц приведено на рис. 6. К сожалению, на фазе максимума приемник на этой частоте вошел в режим насыщения. Тем не менее, заметно что, фазы роста и спада сигнала на всех трех частотах совпадают.

Данные рентгеновского излучения представлены на рис. 7. Как видно на рисунке, поведение во времени миллиметрового радиоизлучения схоже с мягким рентгеновским излучением, а в жестком рентгеновском излучении развитие вспышки произошло на несколько десятков секунд раньше.

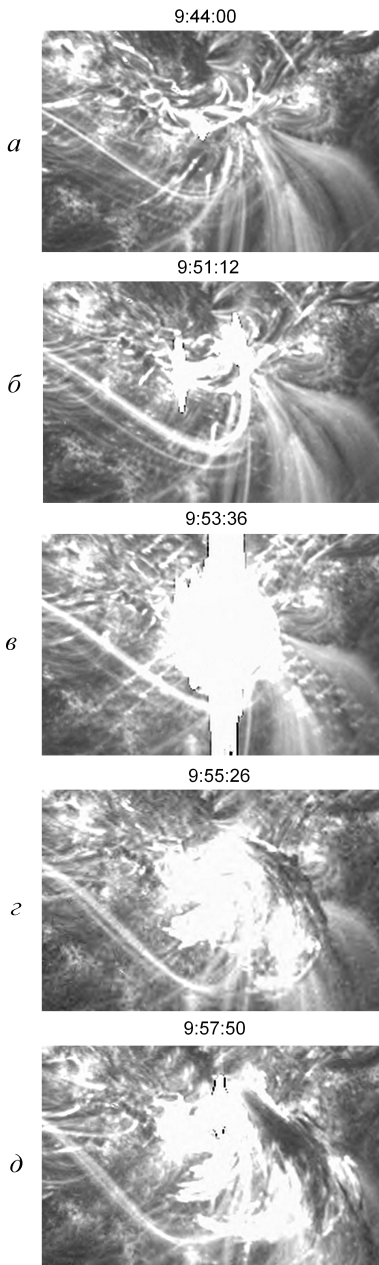


Рис. 4. Изображение активной области в линии железа Fe 171 Å на различных стадиях развития вспышки (SDO)

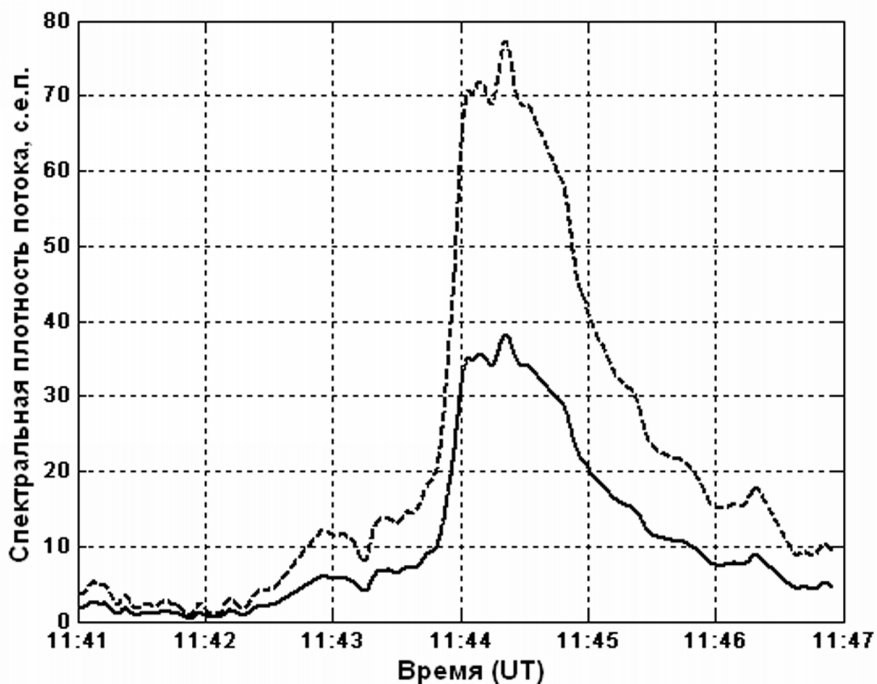


Рис. 5. Зависимость спектральной плотности потока радиоизлучения на частотах 93,2 ГГц (—) и 139,8 ГГц (---) от времени. Вспышка 05.07.2012

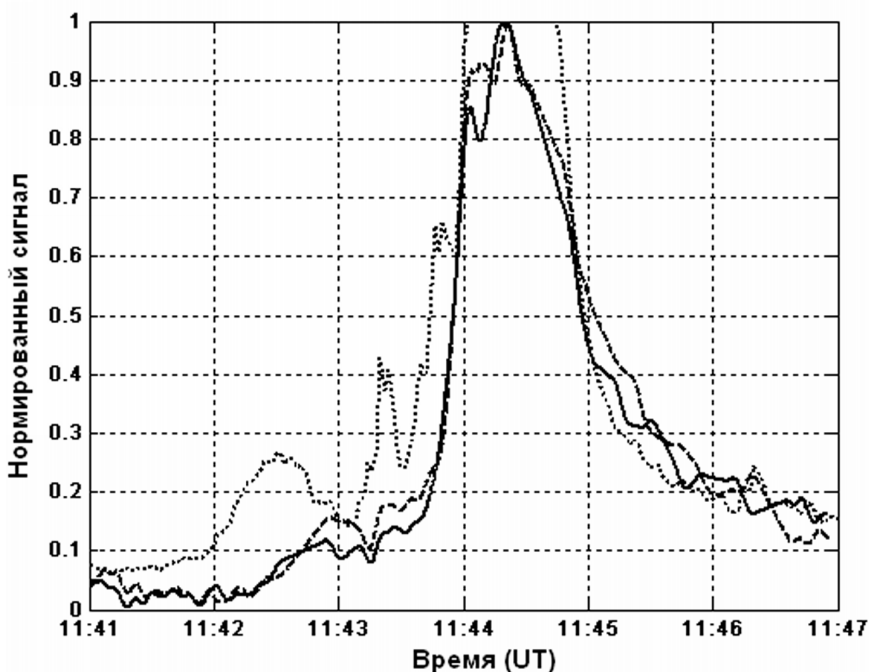


Рис. 6. Зависимость нормированного сигнала радиоизлучения на частотах 11,2 ГГц (.....), 93,2 ГГц (—) и 139,8 ГГц (- - -) от времени. Вспышка 05.07.2012

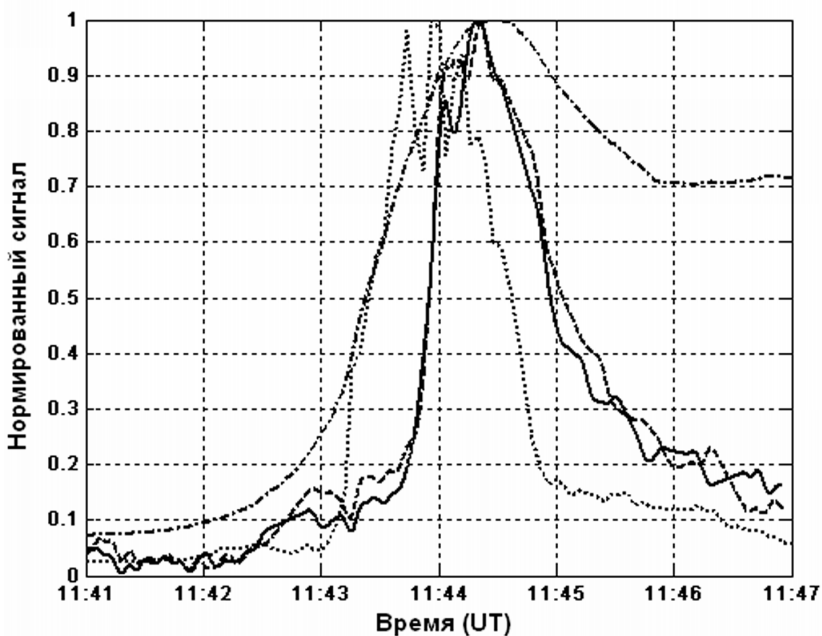


Рис. 7. Зависимость нормированного сигнала радиационного излучения на частотах 93,2 ГГц (—) и 139,8 ГГц (---), мягкого рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 1-8 Å (— · —) и жесткого рентгеновского излучения в диапазоне энергии квантов 25...50 кэВ (· · · · ·) от времени. Вспышка 04.07.2012

Анализ результатов наблюдений. Обзор разнообразных данных наблюдений показал, что обе вспышки развивались по схожему сценарию. Предположительно данные события могут быть описаны в рамках электродинамической модели вспышки [3, 4]. Небольшая область повышенной яркости, наблюдавшаяся на изображениях (см. рис. 4, а), сделанных до начала вспышки, может представлять собой токовый слой, образовавшийся при сближении петель с противоположно направленным магнитным полем. В момент начала вспышки слой начал распадаться, в результате чего нетепловые частицы и плазма устремились вдоль линий магнитного поля в хромосферные основания петель. Там произошел импульсный нагрев плазмы, вызвавший ее резкое расширение и подъем в корону. Образование высокотемпературной области с плазмой, имеющей хромосферные значения концентрации тепловых электронов ($n_e = 10^{10} \dots 10^{11} \text{ см}^{-3}$), совпало с фазой максимума миллиметрового радиационного излучения. Дальнейшее расширение плазмы вдоль магнитного поля привело к уменьшению ее плотности и оптической толщины для миллиметрового радиационного излучения, что вызвало уменьшение его интенсивности.

Таким образом, можно предположить, что основным источником нестационарного миллиметрового радиационного излучения для обеих вспышек была высокотемпературная плотная плазма в магнитных петлях.

Повышение интенсивности жесткого рентгеновского излучения свидетельствует о наличии нетепловых электронов, которые могут генерировать гиротронное радиоизлучение в микроволновом диапазоне. Однако вклад этого источника в поток нестационарного миллиметрового радиоизлучения, вероятно, очень мал.

Положительным в этих предположениях является следующее. Спектр миллиметрового радиоизлучения вспышек не сильно отличается от спокойного Солнца, т. е. соответствует тормозному излучению тепловых электронов в оптически толстой плазме. Фаза максимума у миллиметрового радиоизлучения совпадает с мягким рентгеновским излучением, источником которого также является высокотемпературная плазма в короне, и запаздывает относительно жесткого рентгеновского излучения. В каналах жесткого рентгеновского излучения с энергиями квантов выше 50 кэВ заметного повышения сигнала от вспышки не наблюдалось, поэтому вряд ли имелось значительное количество электронов с энергиями выше 500 кэВ, которые генерируют гиротронное излучение в миллиметровом диапазоне.

В связи с этим для интерпретации и анализа полученных данных на наш взгляд не пригоден подход, описанный в работе [5], в котором предполагается наличие во вспышках класса C значительного числа нетепловых электронов с энергиями в несколько мегаэлектронвольт. Более предпочтительным мы считаем подход, приведенный в работе [6], где объективно оценено значение тепловых и нетепловых источников вспышечного миллиметрового радиоизлучения. Следуя приведенной в работе [6] методике расчета параметров плазмы и высокоэнергичных электронов, сделаем оценку температуры плазмы во вспышечных магнитных петлях.

Главным предположением, необходимым для выполнения такой оценки является то, что во время фазы импульсного нагрева хромосферной плазмы высокоэнергичными электронами в хромосфере существуют области с температурой, не зависящей от глубины. Существование таких областей было предсказано в работе [4] на основе численного моделирования процесса импульсного нагрева хромосферы ускоренными электронами. Если глубина такой области больше чем оптическая толщина плазмы для радиоизлучения на соответствующих частотах, то можно считать, что яркостная температура радиоизлучения близка к кинетической температуре плазмы.

Для того чтобы оценить яркостную температуру источника вспышечного миллиметрового радиоизлучения, необходимо знать его площадь. Ее приблизительное значение можно найти из полученных на SDO изображений в ультрафиолетовой линии He 304Å, излучение в которой генерируется на высотах верхней хромосферы и пе-

реходного слоя, близких к области генерации миллиметрового радиоизлучения. На начальной стадии развития вспышки 4 июля 2012 г. до появления засветки на изображениях источник повышенной яркости имел площадь $S' = 0,18$ кв. угл. мин, что соответствует $S = 3,2 \cdot 10^8$ км². Если подставить в формулу (6) значения спектральной плотности потока на фазе максимума всплеска миллиметрового радиоизлучения $F_{\text{Flare}}(93,2) = 23,7$ с. е. п., $F_{\text{Flare}}(139,8) = 44,5$ с. е. п., а вместо θ_D площадь источника S' , то получим следующие значения яркостной температуры для соответствующих частот: $T_{b\text{Flare}}(93,2) = 2,56 \cdot 10^5$ К и $T_{b\text{Flare}}(139,8) = 2,13 \cdot 10^5$ К. Различные значения яркостной температуры для разных частот свидетельствуют о том, что в источнике миллиметрового радиоизлучения температура плазмы меняется вместе с оптической толщиной. Тем не менее она близка к значениям яркостной температуры $T_p \approx 2,5 \cdot 10^5$ К.

Для вспышки 5 июля 2012 г. площадь источника $S' = 0,21$ кв. угл. мин, и для максимальных значений спектральной плотности потока $F_{\text{Flare}}(93,2) = 38,2$ с. е. п., $F_{\text{Flare}}(139,8) = 77,5$ с. е. п., соответствующие значения яркостной температуры составили $T_{b\text{Flare}}(93,2) = 2,98 \cdot 10^5$ К и $T_{b\text{Flare}}(139,8) = 2,71 \cdot 10^5$ К, а температура плазмы $T_p \approx 3 \cdot 10^5$ К.

Сделанные оценки весьма приблизительны и основаны на модельных предположениях и допущениях, которые могут не выполняться в реальной ситуации. Для получения более точных значений параметров плазмы на разных стадиях вспышки необходимо провести детальный расчет процесса ее нагрева и расширения и сопутствующей эволюции характеристик ее излучения в различных диапазонах. Тем не менее, даже эти приблизительные оценки вполне согласуются с характерными значениями температуры вспышечной плазмы в хромосфере и переходном слое.

Анализ полученных на радиотелескопе РТ-7,5 результатов наблюдений миллиметрового радиоизлучения солнечных вспышек, показал, что они согласуются с данными наблюдений этих же событий на других инструментах и общепринятыми теоретическими представлениями о физических процессах, происходящих во вспышке. Для дальнейшего развития исследований в этом направлении необходимо получение новых экспериментальных данных, повышение их точности и систематизация, а также разработка усовершенствованной модели источника нестационарного миллиметрового радиоизлучения, учитывающей изменение параметров плазмы и высокоэнергичных электронов на разных стадиях вспышки.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 гг.

1. A new solar burst spectral component emitting only in the Terahertz range / Kaufmann P., Raulin J.P., de Castro C.G.G. et al. // *The Astrophysical Journal*. – 2004. – Vol. 603. – No. 2. – P. L121–L124.
2. Лукичева М. А. Структура и динамика солнечной хромосферы на основе наблюдений в миллиметровом диапазоне: Дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.03.02. – М.: РГБ, 2005.
3. Сыроватский С. И., Сомов Б. В. Физические процессы в атмосфере Солнца, вызываемые вспышками // *Успехи физических наук*. – 1976. – Т. 120. – № 2. – С. 217–257.
4. Вспышечные процессы в плазме / С.И. Сыроватский, Сомов Б.В., Подгорный А.И. и др. // *Тр. Физического института им. П.Н. Лебедева Академии наук СССР*. – 1979. – Т. 110.
5. Kundu M. R, White S. M., Shibasaki K, Sakurai T. Nonthermal flare emission from MeV energy Electrons at 17, 34 and 86 GHz // *The Astrophysical Journal*. – 2000. – Vol. 545. – No. 2. – P. 1084–1088.
6. Urpo S., Bakhareva N. M., Zaitsev V. V., Stepanov A. V. Comparison of mm-wave and X-ray diagnostics of flare plasma // *Solar Physics*. – 1994. – Vol. – 154. – No. 2. – P. 317–334.

Статья поступила в редакцию 07.09.2012