

О СВЯЗИ МЕЖДУ МИКРОВОЛНОВЫМ И МЕТРОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ 3 ИЮНЯ 2021 ГОДА

Ю.Н. Шамсутдинова, Д.А. Жданов, Л.К. Кашапова

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
yulia@iszf.irk.ru

STUDYING RELATIONSHIP BETWEEN MICROWAVE AND METER WAVELENGTH EMISSION DURING THE SOLAR FLARE ON JUNE 3, 2021

Yu.N. Shamsutdinova, D.A. Zhdanov, L.K. Kashapova

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia
yulia@iszf.irk.ru

Аннотация. Представляем результаты исследования события, произошедшего в 01:36 UT 3 июня 2021 г. и наблюдавшегося одновременно в метровом радиодиапазоне спектрографами сети E-Callisto в диапазоне 15–87 МГц и на Сибирском радиогелиографе (СРГ) в диапазоне 3–6 ГГц, а также на Бадарском широкополосном спектрополяриметре 4–8 ГГц. Анализ динамических спектров в метровом диапазоне выявил, что событие состоит из серии радиовсплесков III типа и J-типа. На средних временных профилях микроволнового и рентгеновского излучения выявлен только один всплеск, который соответствует самому мощному радиовсплеску III типа. Спектральные свойства микроволнового и рентгеновского излучения указывают на наличие ускоренных электронов и общую природу излучения в этих диапазонах. Анализ временных профилей СРГ, полученных для двух вспыхивающих источников, позволил найти задержки между микроволновым и метровым излучением в диапазоне 75–79 МГц для тех всплесков, которые были неразличимы на средних временных профилях.

Ключевые слова: солнечная вспышка, ускоренные электроны, микроволновое излучение, метровое излучение, всплески третьего типа.

Abstract. We present the preliminary results of the flare analysis. It took place at 01:36 UT on June 3, 2021. The event was observed by E-Callisto spectrograph network and in microwaves by the Siberian Radioheliograph (SRH) within the range from 3 to 6 GHz. We found several type III and type-J bursts in the meter radio range. At the same time, only one burst was detected in the averaged time profiles of microwaves emission and X-ray emission. It corresponded to the strongest type III radio burst. The spectral properties of microwaves and X-ray emissions indicate the presence of accelerated electrons. Analysis of the SRH time profiles, obtained for two flare sources, allowed us to find delays between microwaves and meter wavelength in the range from 75 to 79 MHz for the meter radio bursts which were undistinguishable in averaged time profiles. A possible scenario of this event was discussed.

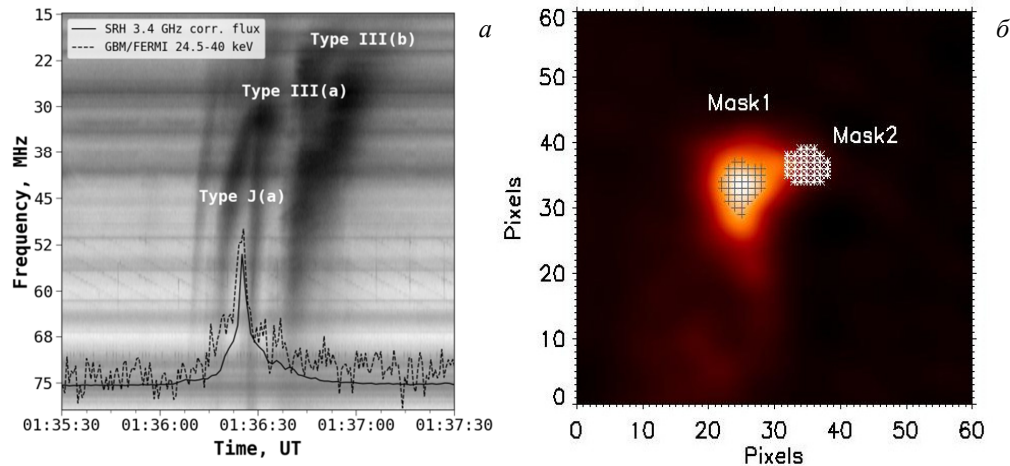
Keywords: solar flare, type III burst, X-ray emission, microwave emission, meter emission, accelerated electrons.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечные вспышки являются событиями с мощнейшим выделением энергии в Солнечной системе — за десятки минут может высвободиться энергия свыше 10^{32} эрг. Они излучают волны в широком диапазоне электромагнитного спектра, от радио до гамма-лучей, а также тесно связаны с ускорением частиц в межпланетном пространстве и с корональными выбросами массы. Термин «вспышка» обычно используется для обозначения электромагнитного излучения всего события. Основная классификация «значимости» вспышек основана на потоке мягкого рентгеновского излучения 1–8 Å, измеренном GOES. Вспышки разделены на классы X, M, C, B и A, где X соответствует рентгеновскому потоку, превышающему 10^{-4} Вт м⁻², а во всех последующих классах значение максимального потока уменьшается в 10 раз [Fletcher et al., 2011]. Таким образом, данная классификация позволяет распределить вспышки по энергии, выделяемой в одном из диапазонов электромагнитного спектра.

Вспышка возникает в результате быстрого высвобождения энергии, ранее накопленной в виде индуктивных магнитных полей, генерируемых электрическими токами, возникающих в магнитных структурах активных областей. Наиболее распространенной моделью, описывающей процессы во время вспышек, является так называемая стандартная

модель. Согласно этой модели, ускорение частиц во время вспышки происходит в короне, после чего освободившиеся в местах их первичного выделения энергии частицы (электроны) с высокими энергиями начинают двигаться в противоположных направлениях вдоль направлений линий магнитного поля. Часть электронов опускается в нижние слои солнечной атмосферы и генерирует микроволновое и рентгеновское излучение. Другая часть электронов движется вверх в корону и далее, в межпланетное пространство, и становится источником радиовсплесков III типа. Механизмы генерации излучения в этих двух случаях различны. В нижних слоях атмосферы излучение в основном формируется за счет некогерентного механизма, а метровое — за счет когерентных механизмов. Однако в случае стандартной модели мы можем ожидать, что если частицы имеют общий источник, то временные профили микроволнового и метрового излучения должны согласовываться. Наблюдения показывают, что связь между микроволновым, рентгеновским и метровым излучением очень сложная. До сих пор нет однозначного ответа, связано ли это с недостаточной чувствительностью приборов в рентгеновском и микроволновом диапазонах, или является особенностью генерации излучения когерентным механизмом (плазменным). Данная работа посвящена анализу слабой вспышки, позволяющей протестировать реализацию стандартной модели солнечной вспышки.



Динамический радиоспектр для события 3 июня 2021 г. по данным e-Callisto (INDIA-GAURI), корреляционная кривая микроволнового излучения СРГ на частоте 3.4 ГГц и временной профиль потока рентгеновского излучения GBM/FERMI (а). Изображение СРГ на частоте 3.4 ГГц (б). Размер одного пиксела равен 5 угл. сек. Показано положение двух масок

ДАННЫЕ И АНАЛИЗ

Исследуемое событие произошло 3 июня 2021 г., максимум в 01:36 UT в активной области 12829 (S18E35). Это событие было зарегистрировано Сибирским радиогелиографом (СРГ) в диапазоне 3–6 ГГц [Лесовой и др., 2017]. Длительность события была меньше минуты. Согласно наблюдениям КА GOES, класс вспышки В1. Такие слабые события, как правило, развиваются по простому сценарию. Именно поэтому слабые вспышки являются подходящим объектами для проверки границ применимости стандартной модели солнечной вспышки.

В данной работе мы использовали данные различных инструментов для проверки связи между различными диапазонами электромагнитного спектра.

Сибирский радиогелиограф — Т-образный радиогелиограф с 256-антенной решеткой, предназначенный для регистрации явлений на Солнце в микроволновом диапазоне 3–24 ГГц. Инструмент расположен в Радиоастрофизической обсерватории (РАО) (урочище Бадары, Республика Бурятия) [Лесовой и др., 2017]. В той же обсерватории находится и Бадарский широкополосный микроволновый спектрополяриметр 4–8 ГГц [Zhdanov, Zandanov, 2015]. Данные этого прибора были использованы при анализе спектральных свойств излучения. Информация о метровом диапазоне 15–87 МГц была получена из наблюдений сети спектрографов E-Callisto [Benz et al, 2005], ст. GAURI (Индия). Наблюдения в рентгеновском диапазоне The Gamma-Ray Burst Monitor (GBM/FERMI) [Meegan et al., 2009] позволили провести спектральный анализ рентгеновского излучения в максимуме события и построить временной профиль нетеплового рентгеновского излучения, напрямую связанного с электронами, генерирующими радиовсплески III типа. Отметим, что спектральный анализ для максимума микроволнового и рентгеновского излучения выявил согласованность по спектральным параметрам (4.7 и 4.1 соответственно).

На рисунке (а) представлен динамический спектр

в метровом диапазоне с временными профилями в рентгеновском и микроволновом диапазонах. Мы видим, что в микроволновом и рентгеновском диапазонах наблюдается один всплеск, а в метровом диапазоне минимум три всплеска. Динамический спектр в метровом диапазоне выглядит гораздо сложнее, и возникают вопросы: есть ли пространственная и физическая связь между всплесками в метровом и микроволновом диапазонах, а также можно ли объяснить событие, используя стандартную модель.

Сравнение временного профиля в рентгеновском диапазоне с временным профилем метрового излучения выявило задержку 15 с для самого мощного всплеска III типа (b). Такую же задержку показало сравнение средних временных профилей микроволнового излучения. Это означает время перемещения ускоренных электронов от места первичного выделения энергии (индикатором которого является излучение в рентгеновском диапазоне) до высоты формирования излучения в метровом диапазоне на частотах 75–79 ГГц.

Далее вспышечный микроволновый источник на изображениях, полученных с помощью СРГ, был разделен на две части с использованием двух масок для лучшего понимания эволюции события (панель б). Таким образом, мы получили два источника — восточный (маска 1) и западный (маска 2). Для всплеска III типа (b) полученные временные профили для маски 1 и маски 2 на частоте 3.4 ГГц показывают наличие отклика в обоих источниках с задержкой 15 с. Для всплеска J (a) соответствующий всплеск обнаружили на временном профиле, полученном с помощью маски 2 с задержкой 9 с. Отклик для всплеска III типа (a) обнаружен на временном профиле, полученном для маски 1 с задержкой 7 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проделанного анализа мы можем сделать следующие выводы:

1. Использование разделения потоков двух источ-

ников позволило обнаружить связь между микроволновым и метровым излучением во время события.

2. Сравнение временных профилей микроволнового излучения, полученных для разных источников с временным профилем в метровом диапазоне, выявило, что всплеск III (b) и всплеск J (a) связаны с западным микроволновым источником. Всплеск III (a) связан с восточным микроволновым источником.

3. Фотометрия с использованием пространственно-разрешенных наблюдений позволяет получить более точную зависимость между микроволновым и метровым диапазоном.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Лондонского королевского общества 21-52-10012 КО-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Лесовой С.В., Алтынцев А.Т., Кочанов А.А. и др. Сибирский радиогелиограф: первые результаты. *Солнечно-земная физика*. 2017. Т. 3, № 1. С. 3–16.

Benz A.O., Monstein C., Meyer H. Callisto: A new concept for solar radio spectrometers. *Solar Phys.* 2005. Vol. 226, iss. 1. P. 143–151.

Fletcher L., Dennis B.R., Hudson H.S., et al. An observational overview of solar flares. *Space Sci. Rev.* 1983. Vol. 159. P. 19–106.

Meegan C., Lichti G., Bhat P. N., et al. The Fermi Gamma-ray Burst Monitor. *Astrophys. J.* 2009. Vol. 702. P. 791–804.

Zhdanov D.A., Zandanov V.G. Observations of microwave fine structures by the Badary Broadband Microwave Spectropolarimeter and the Siberian Solar Radio Telescope. *Solar Phys.* 2015. Vol. 290, iss. 1. P. 287–294.