Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 110–113.

УДК 523.985
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-110

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО СПЕКТРА СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ 18 ИЮНЯ 2023 ГОДА

В.С. Могилевцев, Л.К. Кашапова

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,
cloud_beavis@mail.ru

MICROWAVE SPECTRAL ANALYSIS OF THE SOLAR FLARE OF JUNE 18, 2023

V.S. Mogilevtsev, L.K. Kashapova

Institute of Solar-Terrestrial Physics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia,
cloud_beavis@mail.ru

Аннотация: Анализ гиросинхротронного излучения солнечных вспышек, для получения численных параметров солнечной плазмы, является одной из актуальных задач, решение которой необходимо для развития численных моделей солнечных вспышек. В настоящее время разработанные численные методы удовлетворительно работают для вспышек, излучение которых можно описать с помощью одного источника. Однако реальные вспышки редко соответствуют такой модели. В данной работе представлены результаты исследования микроволнового спектра сложной формы, наблюдавшегося во время вспышки 18 июня 2023 года. Для построения изображений и спектров микроволнового излучения, используются данные Сибирского радиогелиографа (СРГ) и спектрополяриметра SOLARSPEL. Информация об источниках рентгеновского излучения была получена по данным космической обсерватории ASO-S/HXI. Магнитограмма (проекция вектора магнитного поля на луч зрения) была получена на космической обсерватории SDO/HMI. На той же обсерватории находятся телескопы AIA, с помощью которых были получены изображения в крайнем ультрафиолете. Было показано, что сложный спектр является результатом излучения не менее двух вспышечных источников, связанных с магнитными полями разной напряжённости.

Ключевые слова: солнечные вспышки, гиросинхротронное излучение

Abstract: Analysis of gyrosynchrotron emission of solar flares to derive numerical parameters of solar plasma is an actual task necessary for the development of numerical flare models. Current numerical methods provide satisfactory results for flares whose emission can be described by a single source. However, real flares rarely fit such a model. This paper presents a study of a complex-shaped microwave spectrum observed during the flare of June 18, 2023. Microwave images and spectra were constructed using data from the Siberian Radioheliograph (SRH) and the SOLARSPEL spectropolarimeter. Information on X-ray sources was obtained from the ASO-S/HXI space observatory. A magnetogram (the line-of-sight projection of the magnetic field vector) was taken from the SDO/HMI space observatory. The same observatory hosts the AIA telescopes which have provided extreme ultraviolet images. We show that the complex spectrum results from the emission of at least two flare sources associated with magnetic fields of different values.

Keywords: solar flares, gyrosynchrotron emission

ВВЕДЕНИЕ

Гиросинхротронное излучение возникает в солнечных вспышках при движении умеренно релятивистских электронов (Лоренц фактор $\gamma < 3$) в магнитном поле. Под действием силы Лоренца, электроны начинают вращаться вокруг силовых линий магнитного поля, приобретая центростремительное ускорение. Такое ускорение и вызывает излучение.

Типичная форма спектра представляет собой рост солнечного потока на низких частотах с увеличением частоты. На пиковой частоте значение потока достигает максимума. После достижения максимума, наблюдается спад потока. В результате спектр имеет колоколобразную форму. Значение пиковой частоты спектра можно оценить по приближенной формуле (1) [Dulk, 1985]

$$\nu_{\text{п}} \approx 2.72 \cdot 10^3 10^{0.27\delta} \sin(\theta)^{0.41+0.03\delta} (NL)^{0.32-0.03\delta} B^{0.68+0.03\delta}, \quad (1)$$

где θ – угол между магнитным полем и направлением распространения излучения, N – плотность нетепловых электронов, L – размер источника, $\nu_{\text{п}}$ – пиковая частота, δ – степенной индекс распределения энергии электронов.

В данной работе рассматривается солнечная вспышка класса M1.3, произошедшая 18 июня 2023 года. Она находится в активной области NOAA 13336, гелиоцентрические координаты x = -258" y = -360". Начало вспышки было зарегистрировано в 00:25:00 UT. Максимум вспышки был в 00:31:00 UT, ее окончание в 00:40:00 UT. На рисунке 1 представлен временной профиль и спектр излучения по данным спектрополяриметра SOLARSPEL

Как можно увидеть из рисунка 1 на правой панели, форма спектра в максимуме развития, значительно отличается от типовой формы, наблюдавшейся в начале вспышки. Различие в том, что вместо одного ярко выраженного максимума распределения потока с частотой, мы имеем более плоский спектр со слабовыраженными пиками. В работе [Fleishman et al., 2011], спектр с похожей аномальной формой был объяснен двумя источниками излучения, находящимися в областях с различными магнитными полями 57 - 370 Гс. Возможно, форма нашего спектра имеет то же объяснение. Чтобы проверить эту гипотезу, необходимо выделить два источника излучения и проанализировать их микроволновые спектры с помощью данных Сибирского радиогелиографа (СРГ) [Алтынцев и др., 2020] и двух космических обсерваторий ASO-S/HXI и SDO.

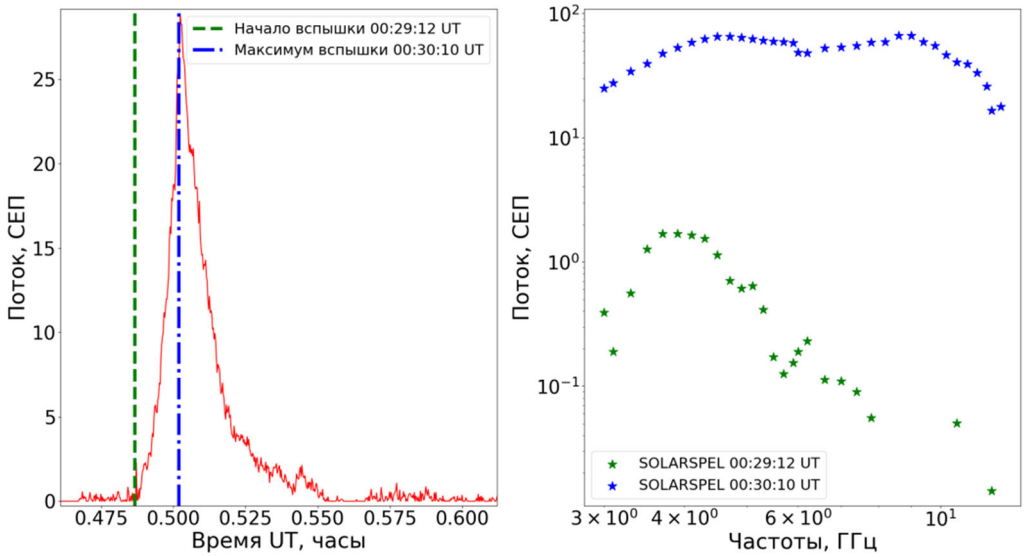

Рис.1. На левом графике временной профиль солнечного потока. Зеленой штрихованной линией отмечено начало развития вспышки, синей штрихпунктирной линией, отмечен максимум развития вспышки. На правом графике спектр излучения по данным SOLARSPEL. Зеленым цветом отмечены точки спектра в начале развития вспышки, синим цветом, отмечены точки в моменте максимума развития вспышки

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вначале была проведена процедура центрирования изображений СРГ. Для этого на каждом изображении была выбрана активная область (пятенный микроволновый источник), не совпадающая с областью солнечной вспышки. Затем получались координаты центроида источника в поляризации и координаты центроида магнитных полей по данным СРГ и SDO/HMI, соответственно. По этим координатам и был осуществлен сдвиг изображений, полученных СРГ в поляризации и интенсивности. На рисунке 2 (левая панель) на изображение в полосе 131 Å SDO/AIA, контурами нанесены микроволновые вспышечные источники. Они были получены после вычитания изображения, полученного до вспышки, из изображения, полученного в момент вспышки на нескольких частотах. Также контуром нанесен источник рентгеновского излучения 30-100 кэВ, полученный по данным ASO-S/HXI. На рентгеновском источнике, контурами нанесены области 10%,30%,50%,70% от максимальной интенсивности излучения. Верхняя область (северный источник) этого источника имеет большую интенсивность, в сравнении с нижней областью (южный источник). Центры этих областей мы будем считать центрами искомых источников с разными магнитными полями. В качестве маски для вычисления потока для обоих источников, возьмем проекцию диаграммы направленности СРГ на частоте 3 ГГц (рис.2, правая панель).

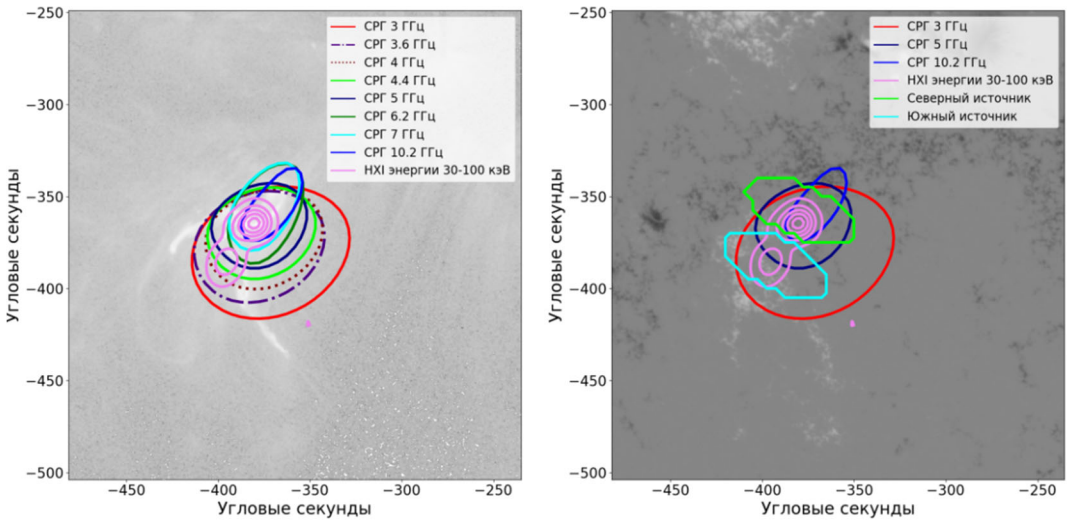

Рис.2. На левой стороне, изображение в ультрафиолетовом диапазоне 131 Å с наложенными областями излучения по данным СРГ и областью рентгеновского излучения с энергиями частиц 30–100 кэВ. На правой стороне магнитограмма в активной области NOAA 13336 с двумя характерными областями искомых источников

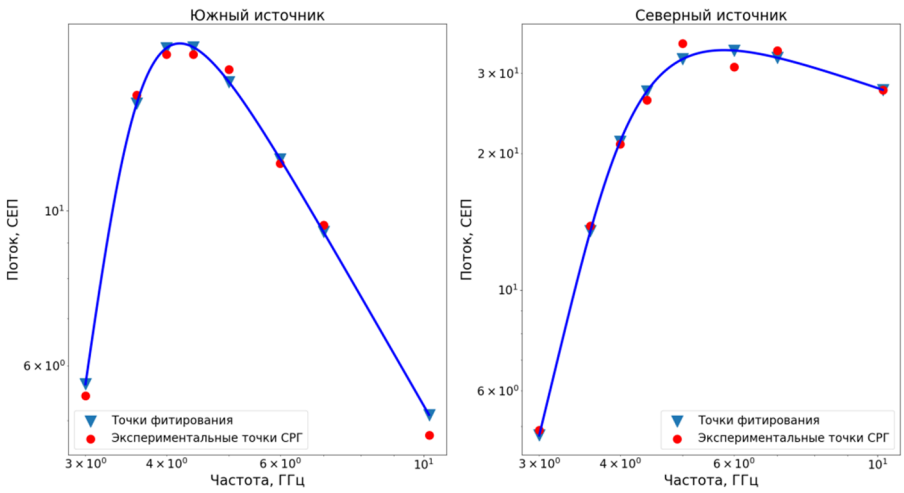

Рис.3. Спектры потока. На левом графике для северного источника, на правом графике для южного источника

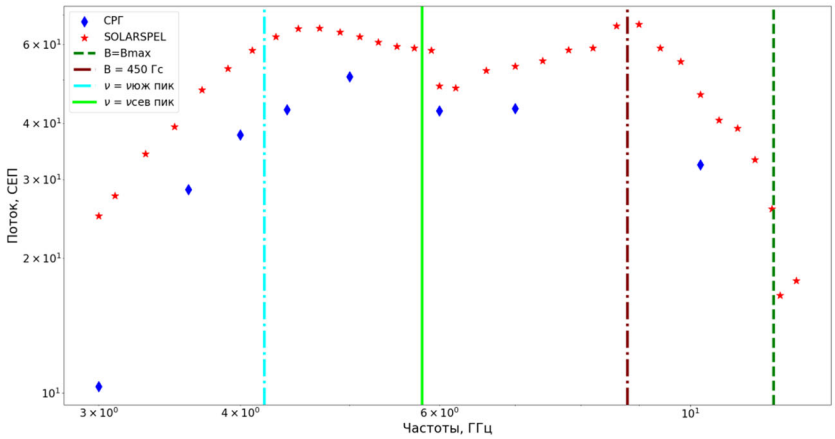

Рис.4. Спектр излучения по данным SOLARSPEL и СРГ. Вертикальные черты слева направо показывают: пиковую частоту южного источника; пиковую частоту северного источника; частоту для возможного источника с магнитным полем 450 Гс; частоту источника внутри северной области с максимальным значением магнитного поля

После того, как были выделены области возможного положения источников, для них были получены спектры (рис.3) На левом рисунке представлен спектр для южного источника - форма спектра выглядит стандартной для гиросинхротронного излучения. На правом графике форма спектра напоминает тормозное излучение, однако резкий рост потока не соответствует форме спектра, ожидаемого при таком механизме излучения.

Для южного источника можно вычислить значение магнитного поля по формуле (1). Угол θ считается как угол между лучом зрения и источником, где за угол в 0° считается центр диска, а угол в 90° это лимб Солнца. Плотность нетепловых электронов N была определена из анализа спектра рентгеновского излучения с 00:30:07 по 00:30:29 UT с помощью фитирования (подгонки спектра) моделью, состоящей из функции излучения теплового тормозного излучения и функции «толстой мишени», описывающей излучение ускоренных электронов. В результате фитирования было получено значение скорости потока электронов в секунду. За размер источника L был принят линейный размер рентгеновского источника излучения на уровне 70% от максимума. Пиковую частоту $\nu_п$ можно вычислить из графиков фитирования. Чтобы найти степенной индекс, нужно вычислить спектральный индекс α, который можно получить из формулы (2), по которой производилось фитирование [Silva et al., 2000]

$$f(\nu) = a_1\nu^{a_2}[1 - exp(-a_3\nu^{-a_4})], \qquad (2)$$

где $a_1a_2a_3a_4$ – коэффициенты фитирования f(ν) – значение потока в СЕП ν – частота в Гц.

После вычисления коэффициентов фитирования, можно найти спектральный индекс для высоких частот $\alpha = \alpha_4 - \alpha_2$. Этот индекс понадобится для вычисления электронного индекса по формуле (3) [Silva et al., 2000]

$$\delta = 1.11\alpha + 1.36, \qquad (3)$$

где δ – степенной индекс распределения энергии электронов, α – спектральный индекс

Оценив параметры, получаем следующие значения: θ = 32°, N = $8.2\cdot10^7$ см$^{-3}$, L = $4.9\cdot10^8$ см, $\nu_{пю}$= $4.2\cdot10^9$ Гц, δ = 3.15. Согласно формуле (1), напряженность магнитного поля южного источника должна быть $B_{ю}$ = 173 Гс.

Для северного источника можно оценить значение магнитного поля, пользуясь значениями на магнитограмме, полученной SDO/HMI. Можно найти максимальное значение внутри интересующей нас области и используя это значение вычислить максимальную возможную

пиковую частоту по формуле (1). По той же формуле можно рассчитать значение магнитного поля по значению пиковой частоты $\nu_{пс} = 5.8 \cdot 10^9$ Гц, используя параметры вспышечной плазмы, определенные выше. В этом случае магнитное поле в северном источнике должно быть около $B_c = 262$ Гс. На рисунке 4, помимо максимального значения магнитного поля, были выделены частоты для других значений магнитного поля, которые могли бы вносить вклад в спектр аномальной формы. Также были отмечены пиковые частоты, полученные по результатам фитирования формы спектра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования вспышки, удалось выделить два источника гиросинхротронного излучения, связанных с магнитными полями разной напряженности. Удалось оценить значение плотности магнитного потока, используя приближенную формулу для одного из источников (южного) и она равна 173 Гс. В случае северного источника, форма спектра указывает на то, что источник гиросинхротронный, но внутри выбранной области может находиться еще несколько источников излучения, связанных с разными магнитными структурами. Возможно, из-за малых размеров в сравнении с размерами диаграммы направленности СРГ их невозможно разделить. Однако оценка магнитного поля по пиковой частоте указывает на то, что оно должно быть не меньше 262 Гс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алтынцев А.Т., Лесовой С.В., Глоба М.В., Губин А.В., Кочанов А.А., Гречнев В.В., Иванов Е.Ф., Кобец В.С., Мешалкина Н.С., Муратов А.А., Просовецкий Д.В., Мышьяков И.И., Уралов А.М., Федотова А.Ю. Многоволновый сибирский радиогелиограф. Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 2. С. 37–50. DOI: 10.12737/szf 62202003.

Dulk G.A. Radio emission from the sun and stars // Annu. Rev. Astrophys. 1985. V. 23. P. 169–224.

Fleishman G.D., Kontar E.P., Nita G.M., Gary D.E. A Cold, Tenuous Solar Flare: Acceleration Without Heating // The Astrophysical Journal Letters. – 2011. – Vol. 731, No. 1. – Art. L19

Silva A. V. R., Wang H., Gary D. E. Correlation of Microwave and Hard X-Ray Spectral Parameters // The Astrophysical Journal. 2000. Vol. 545, No. 2. P. 1116-1123.