*Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 135–138.*

УДК 523.98
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-135

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ СЛАБЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ

**Д. В. Рожкова[1], Л. К. Кашапова[1]**

[1]Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, dariarozhkova@mail.iszf.irk.ru

# STUDYING PLASMA PARAMETERS OF WEAK SOLAR FLARES, BASED ON MICROWAVE OBSERVATIONS

**D. V. Rozhkova[1], L. K. Kashapova[1]**

[1]Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, dariarozhkova@mail.iszf.irk.ru

**Аннотация.** В течение длительного времени слабые солнечные вспышки рассматривались исключительно как события, где доминируют тепловые процессы. Однако ряд исследований, основанных на данных микроволновых наблюдений, обнаружили, что нетепловые процессы также играют важную роль. Это связано с тем, что излучение солнечных вспышек в микроволновом диапазоне формируется преимущественно гиросинхротронным механизмом, который чувствителен к потокам ускоренных частиц. В работе представлены результаты исследования микроволнового излучения ряда слабых солнечных вспышек с использованием моделирования гиросинхротронного излучения, в предположении формирования излучения, как только ускоренными электронами (PLW), так и комбинацией электронов с тепловым и нетепловым распределением по скоростям или энергиям (TPL). Сравнение теоретических спектров и результатов наблюдений позволили оценить параметры плазмы для двух моделей, описывающих излучение. Результаты сравнения показали, что использование двух моделей распределения электронов позволяет оценить диапазон допустимых значений магнитного поля, а также уточнить пространственные параметры источника. Показано, что при интерпретации и применении оценки энергии вспышки по микроволновым данным важно учитывать величину низкочастотного спектрального индекса: если он близок к 3, то можно воспользоваться результатами, полученными при использовании PLW, в иных случаях необходимо учитывать вклад тепловой плазмы, используя модель распределения TPL.

**Ключевые слова:** солнечные вспышки, микроволновое излучение, параметры солнечной плазмы.

**Abstract.** Weak solar flares have long been considered only as events where thermal processes dominate. However, a series of studies based on microwave observations found that non-thermal processes also play an important role. This is related to the domination of the gyrosynchrotron mechanism in the microwave emission of solar flares and its sensitivity to non-thermal electron fluxes. This paper presents results of the study of microwave emission from several weak solar flares. We used gyrosynchrotron emission modeling, assuming that microwave emission is generated by accelerated electrons (PLW) or a combination of electrons with thermal and non-thermal distributions (TPL). Comparison of theoretical and observed spectra allowed us to estimate plasma parameters and then compare them. The comparison results showed that the use of two different electron distribution models helps us to estimate the edges of acceptable magnetic field values and to verify spatial parameters of the source. We show that it is important to take account of the value of low-frequency spectral index when interpreting flare energy estimates from microwave data. If it is close to 3, the PLW results can be used. In other cases, the contribution of thermal plasma must be included, using the TPL distribution model.

**Keywords:** solar flares, microwave emission, parameters of solar plasma.

## ВВЕДЕНИЕ

Любую солнечную вспышку можно рассматривать как акт высвобождения свободной магнитной энергии, которая проявляется как в нагреве плазмы, так и в ускорении частиц. Много лет считалось, что слабые солнечные вспышки (например класса C по GOES) – это события, где доминируют тепловые процессы. Но тем не менее во многих слабых вспышках в настоящее время зарегистрировано микроволновое излучение ускоренных электронов [Sharma, et al., 2020]. Это связано с тем, что микроволновый диапазон, который генерируется в основном гиросинхротронным механизмом, считается более чувствительным к потоку ускоренных частиц. Гиросинхротронное излучение представляет собой магнитормозное излучение умеренно релятивистских электронов с энергиями от десятков кэВ до сотни МэВ. Эти электроны могут иметь как тепловую, так и нетепловую природу. Форма гиросинхротронного спектра зависит одновременно от нескольких параметров излучающей плазмы. В случае слабых вспышек важно оценить вклад ускоренных и тепловых частиц в энергетический баланс, в чем может помочь анализ микроволнового излучения.

В настоящее время разработано множество численных приближений, позволяющих рассчитывать спектральное распределение этого вида излучения, в том числе быстрый гиросинхротронный код из работы [Fleishman, Kuznetsov, 2010]. Минимизируя расхождения между рассчитанным (модельным) спектром с определенным набором параметров плазмы и наблюдаемым микроволновым спектром, можно оценить наиболее вероятные величины различных параметров плазмы в источнике излучения. Этот метод носит название подгонки или фиттирования.

Для более надежной оценки параметров плазмы методом подгонки требуются спектральные наблюдения с высокой чувствительностью и с высоким спектральным разрешением. Сибирский Радиогелиограф (СРГ) обладает высокой

чувствительностью и способен обеспечивать высокое спектральное разрешение наблюдаемых данных для проведения такого рода анализа. СРГ представляет собой интерферометр, состоящий из трех Т-образных независимых антенных решеток, каждая из которых работает в диапазонах частот 3–6, 6–12, 12–24 ГГц. Чувствительность СРГ к потоку излучения составляет примерно 10–3 с.е.п. (солнечных единиц потока) [Алтынцев и др., 2020], в то время как у большинства инструментов этот показатель равен примерно 1 с.е.п.

Набор параметров плазмы, получаемых с помощью метода подгонки, зависит от предполагаемого распределения электронов по скоростям или энергиям. В настоящее время при фиттировании микроволновых спектров в основном используют подход, при котором считается, что доминирует излучение ускоренных электронов. Однако для слабых вспышек может потребоваться учет вклада тепловых электронов, который может быть значительным. В данной работе приводится сравнительный анализ параметров плазмы слабых вспышек, полученных при фиттировании микроволновых спектров с использованием обоих подходов.

## АНАЛИЗ СЛАБЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Для расчета модельных микроволновых спектров был использован метод, описанный в работе [Fleishman, Kuznetsov, 2010] (Fast GS). Меняющимися, входными параметрами, определяющих спектр, являются спектральный индекс электронов δ, плотность тепловых и нетепловых частиц n, температура, угол зрения по отношению к вектору магнитного поля θ, плотность магнитного потока B, линейный размер и глубина источника излучения. Оценка параметров источника и плазмы проводилась в предположении, что в событиях доминирует или только излучение ускоренных электронов (степенное распределение электронов по энергиям (модель PLW)), или с учетом гиросинхротронного излучения тепловой плазмы (комбинация двух независимых функций - тепловой и степенной (модель TPL)).

Для проведения исследования были отобраны семь солнечных вспышек из каталога событий, наблюдавшихся на СРГ [Шамсутдинова и др., 2025]. Интенсивность микроволнового излучения этих событий в максимуме не превышала 27 с.е.п., а рентгеновский класс оценивался от C1.3 до A6.7. Значения пиковой частоты показывают, что излучение оптически толстого и оптически тонкого источников находились в пределах наблюдаемого диапазона СРГ. Три из семи исследуемых событий произошли в одной и той же активной области (NOAA 13349) на фазе спада мощной вспышки, начало которой было около 23:00 UT 2 июля 2023 года.

В ходе исследования для всех событий были получены расчетные микроволновые спектры с использованием моделей TPL и PLW (примеры спектров показаны на рис. 1). Из рис. 1 видно, что результаты фитирования с использованием функции TPL лучше описывают экспериментальные данные в низкочастотной части спектра. Это связано с тем, что данная часть спектра формируется в вершине петли, где доминирует излучение тепловых электронов.

Характерная величина плотности магнитного потока для всех вспышек составила не менее 300 Гс. Такие значения могут указывать на близость микроволнового источника к фотосфере Солнца или на его расположение вблизи мощных солнечных пятен (рис. 2). Однако стоит отметить, что величина магнитного поля, полученная при применении TPL, во всех рассмотренных случаях оказывается выше по сравнению с тем, что дает модель PLW. Такое различие может быть связано с тем, что гиросинхротронный спектр является многопараметрической функцией и некоторые параметры взаимосвязаны друг с другом. Увеличение плотности потока магнитного поля, при использовании модели распределения TPL, может быть связано тем, что плотность нетепловых электронов для всех исследуемых событий уменьшилась по сравнению с тем, что дает метод Fast GS (PLW). И поскольку истинные физические параметры источника точно неизвестны, то использование двух методов позволяет установить диапазон их возможных значений, где полученные значения выступают в качестве нижней и верхней границ.

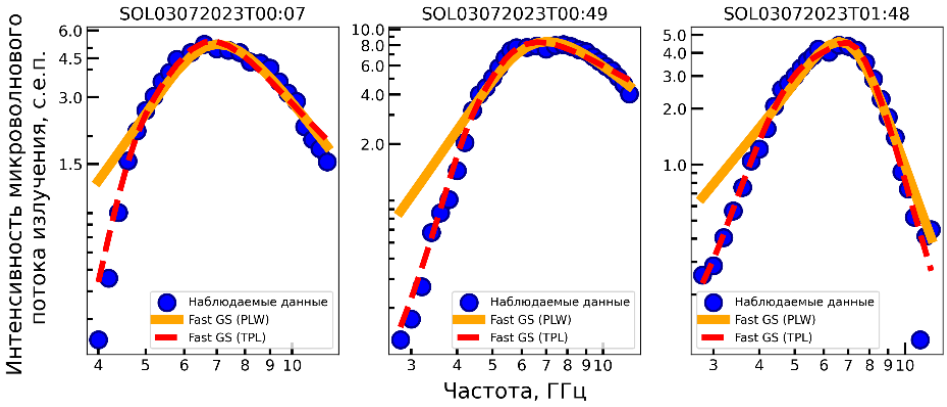


*Рис. 1.* Микроволновые спектры для слабых вспышек, произошедших 3 июля 2023 года на фазе спада мощного события. Синие точки - наблюдательный данные, оранжевая линия - модельный спектр, полученный Fast GS при применении функций распределения электронов по степенному закону (PLW), красная прерывистая линия - модельный спектр, полученный Fast GS при применении комбинации функций теплового и нетеплового распределения электронов по энергиям (TPL)

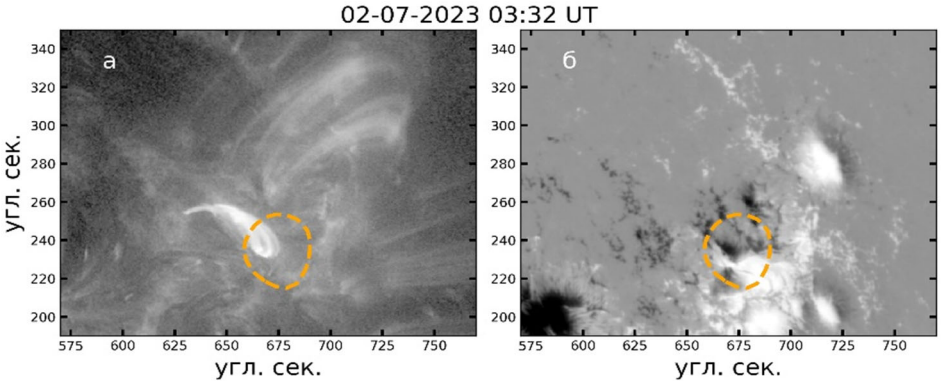


*Рис. 2.* Локализация микроволнового источника события, произошедшего 02. 07. 2023 с максимум в 03:32 UT. Контур получен на уровне 70% от максимума яркости изображения в микроволновом диапазоне на частоте 7 ГГц по данным СРГ. а) изображение, полученное SDO/AIA в линии 131˚A; б) магнитограмма, полученная SDO/HMI

Однако несмотря на то, что задача определения параметров имеет несколько решений, для всех рассмотренных событий площади источников излучения, полученные из анализа изображений в крайнем ультрафиолетовом диапазоне, близки к значениям, найденным в ходе анализа микроволнового спектра. Это указывает на то, что результаты, получаемые с помощью методов моделирования, приближены к реальности. В частности, углы между лучом зрения и вектором магнитного поля, полученные при использовании моделей TPL и PLW, также хорошо согласуются между собой, демонстрируя лишь незначительное расхождение.

Для всех событий были получены значения температур при использовании модели TPL. В двух исследуемых событиях полученные значения температур (200 кК и 100 кК) оказались, значительно ниже корональных значений. Мы предполагаем, что полученные значения температур реальны и свидетельствуют о их расположении в области переходной зоны. Дополнительным аргументом в пользу этого являются высокие значения магнитного поля (700–900 Гс), обнаруженные в этих событиях. Однако не исключено, что вклад тепловых электронов в излучение был недооценен используемыми моделями, что могло привести к занижению расчетной температуры. Отметим, что температуры для других событий были определены от 8 до 10 МК, что типично для нано- и микро-вспышек [Богачев, 2023].

## ЭНЕРГИЯ ИССЛЕДОВАННЫХ СОБЫТИЙ

Интегральная энергия солнечной вспышки или ее энергетический бюджет в основном определяется энергиями горячей плазмы, ускоренных частиц и корональных выбросов массы (КВМ). Согласно статистике мощных эруптивных событий [Emslie et al., 2012], большая часть высвобожденной магнитной энергии преобразуется в кинетическую энергию КВМ, а при наличии ускоренных электронов нетепловая компонента энергии доминирует над тепловой. В данной работе рассматриваются события без КВМ, что дает возможность принять, что полная энергия складывается из энергии ускоренных и тепловых частиц. Параметры плазмы, полученные из микроволновых данных с использованием двух моделей распределения излучающих электронов по энергиям, были использованы в формулах [Emslie et al., 2012] для количественной оценки соответствующих компонент энергии и их последующего сравнения.

В результате было обнаружено, что в исследованных нами слабых вспышках выделенная нетепловая энергия при использовании модели PLW сравнима или немного превышает выделенную тепловую энергию (по модели TPL) для событий, у которых низкочастотный микроволновый индекс которых близок к 3, величине характерной для спектра ускоренных электронов [Dulk, 1985]. Преобладание тепловой плазмы характерно для вспышек с низкочастотными индексами около 2 (типично для теплового излучения) и выше 5 (эффект Разина). В обоих случаях вклад процессов ускорения в полную энергию вспышки меньше по сравнению с тепловыми процессами.

Таким образом, при интерпретации оценки интегральной энергии вспышки в микроволновом диапазоне важно учитывать значения низкочастотного спектрального индекса. При «идеальном» гиросинхротронном излучении ускоренных электронов (спектральный индекс близок к 3) [Dulk, 1985] можно воспользоваться результатами, полученными при использовании модели распределения PLW, в других случаях - модель TPL.

## ВЫВОДЫ

— Пространственные параметры источника слабых солнечных вспышек могут быть уточнены путем метода подгонки микроволнового спектра, полученного для всего Солнца.

— Использование модели распределения TPL (комбинация двух независимых функций - тепловой и степенной) позволяет оценивать локальную температуру в источнике микроволнового излучения.

— Низкочастотный микроволновый спектральный индекс, интервал значений которого

составляет 2.5–3, позволяет использовать только информацию об излучении ускоренных электронов для первичной оценки энергии вспышки. В остальных случаях для корректной оценки необходимо использовать информацию о гиросинхротронном излучении тепловой плазмы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Результаты получены с использованием Уникальной научной установки «Радиогелиограф» ИСЗФ СО РАН. Авторы благодарят коллектив Сибирского Радиогелиографа за предоставленные данные и помощь в обработке данных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Dulk G. A. Radio emission from the sun and stars. // ARA&A. 1985. V. 23, P. 169–224.

Emslie A. G., Dennis B. R., Shih A. Y., Chamberlin P. C. et al. Global Energetics of Thirty-eight Large Solar Eruptive Events // ApJ. 2012. V. 759, is. 1, id. 71. P. 1–18.

Fleishman G. D., Kuznetsov A. A. Fast Gyrosynchrotron Codes // ApJ. 2010. V. 721, no. 2. P. 1127–1141.

Sharma R., Battaglia M., Luo Y., Chen B., et al. Radio and X-Ray Observations of Short-lived Episodes of Electron Acceleration in a Solar Microflare // ApJ. 2020. V. 904, no. 2. id.94. Pp. 13.

Алтынцев А.Т., Лесовой С. В., Глоба М. В., Губин А. В. Многоволновый Сибирский Радиогелиограф // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 2. С. 37—50.

Богачев С. Распределение нановспышек в минимуме солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. 2023. Т. 63, № 4. С. 488—495.

Шамсутдинова Ю. Н., Рожкова Д. В., Кашапова Л. К., Губин А. В. Использование машинного обучения для создания каталога солнечных вспышек по наблюдениям на Сибирском Радиогелиографе // Геомагнетизм и аэрономия. 2025. Т. 65, № 8, С. 1195–1205.