

## **ДИАГНОСТИКА ДИНАМИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОБЛАСТИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СИБИРСКОГО РАДИОГЕЛИОГРАФА**

**Смирнов Д.А., Мельников В.Ф.**

*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия*

## **DIAGNOSTICS OF MAGNETIC FIELD DYNAMICS IN SOLAR FLARES BASED ON DATA FROM THE SIBERIAN RADIOHELIOGRAPH**

**Smirnov D.A., Melnikov V.F.**

*Pulkovo Observatory, St. Petersburg, Russia*

*The paper presents the results of the analysis of images and the frequency spectrum of radiation in the maximum brightness of radio sources during the flares recorded on January 20, 2022 and July 16, 2023 by the Siberian Radioheliograph in the ranges 3–6 GHz and 6–12 GHz. It was found that at the growth phase of the main radiation peaks, the magnetic field decreases, and at the decline phase, on the contrary, it increases.*

**<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-273-276>**

### **Введение**

Развитие методов радиодиагностики солнечных вспышек стало чрезвычайно актуальной темой в последнее время. Особенно важной является возможность получения с помощью этих методов информации о корональном магнитном поле и электронах умеренно релятивистских энергий, что недостижимо в других областях электромагнитного спектра. Задача измерения динамики магнитного поля в корональных радиоисточниках, в частности, скорости изменения его напряженности, имеет отношение к скорости диссипации свободной магнитной энергии во время вспышки, а следовательно, к механизму энерговыделения и ускорения частиц во вспышках.

Для решения этой задачи используется метод определения параметров плазмы вспышечных петель, основанный на развитой теории гиросинхротронного (ГС) излучения [1] и создании быстрых компьютерных кодов [2]. Этот метод радиодиагностики позволяет фитировать расчетные и наблюдаемые спектры излучения и, таким образом, получать данные о напряженности и ориентации магнитного поля, плотности плазмы и параметрах потоков энергичных электронов в радиоисточнике. Применение подобного метода к солнечной вспышке 10.09.2017, зарегистрированной на интерферометре-спектрометре EOVSА [3, 4], выявило неожиданно большую скорость уменьшения магнитного поля в области наиболее яркого микроволнового источника излучения. Это позволило авторам сделать заключение о

высокой скорости диссипации магнитной энергии, способной привести к возникновению супердрайсеровского электрического поля и к очень эффективному нагреву плазмы и ускорению частиц. К сожалению, такого рода радиодиагностика проведена для слишком малого числа вспышек. Необходимы новые наблюдения и соответствующая диагностика других вспышек.

Целью данной работы является микроволновая диагностика вспышечной плазмы методом фитирования по данным Сибирского радиогелиографа.

### **Данные наблюдений и методы анализа**

Для проведения радиодиагностики было отобрано два вспышечных события, наблюдавшихся на СРГ. Это вспышечное событие 20 января 2022 г., произошедшее на северо-западной части солнечного лимба, имевшее GOES класс M5.5 (источник – NOAA №12929), и вспышечное событие 16 июля 2023 г., произошедшее на северо-восточной части солнечного диска, имевшее GOES класс M1.1 (источник – NOAA №13372).

Разработанный алгоритм проведения радиодиагностики заключается в подгонке рассчитываемых с помощью FastGS Codes [2] значений интенсивностей ГС-излучения к наблюдаемым значениям на наборе частот, на которых имеются данные наблюдений. Математически процесс можно описать как минимизацию функционала, записываемого следующим образом:

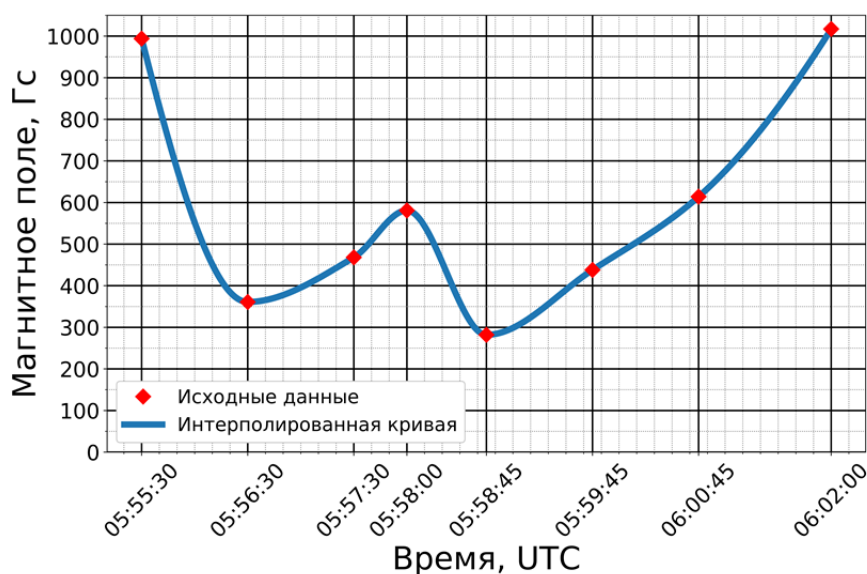
$$K = \sum_{i=1}^n |(I_L^i(x_1, x_2, \dots, x_n) + I_R^i(x_1, x_2, \dots, x_n)j) - (I_{L_{obs}}^i + I_{R_{obs}}^i j)|, \quad (1)$$

где  $I_L$  и  $I_R$  – интенсивности левополяризованного и правополяризованного теоретически рассчитываемого излучения;  $I_{L_{obs}}$  и  $I_{R_{obs}}$  – интенсивности левополяризованного и правополяризованного наблюдаемого в источнике излучения;  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – значения параметров среды внутри радиоисточника. Подробно методы минимизации данного функционала в многомерном пространстве параметров описаны в работе [5].

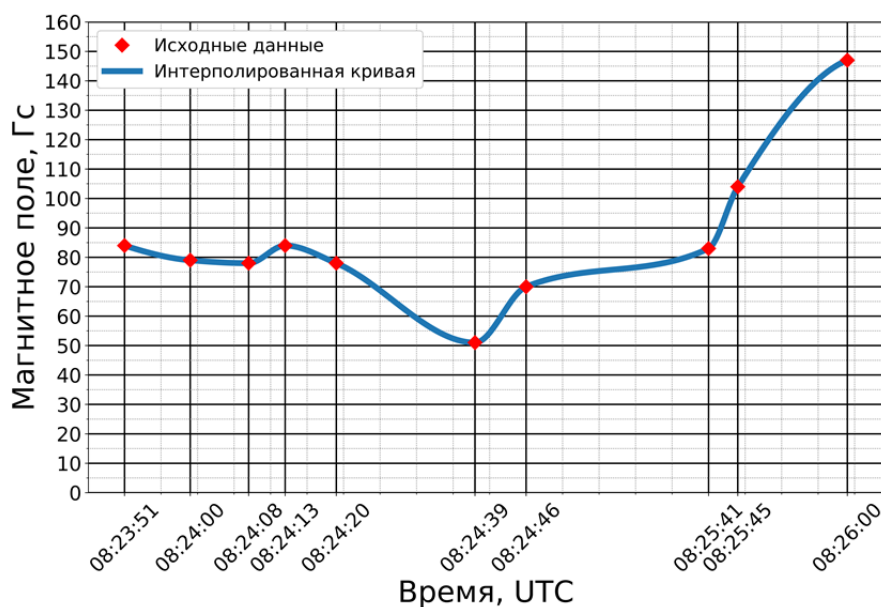
### **Результаты анализа**

Из рис. 1 можно видеть, что в первые минуты вспышки 20 января 2022 г. на фазе роста плотности потока радиоизлучения наблюдается ослабление магнитного поля с  $\sim 990$  до  $\sim 360$  Гс. Это соответствует скорости уменьшения поля  $\Delta B / \Delta t = -11$  Гс/с. Затем после прохождения первого пика 05:56:30 UTC, поле начинает расти. В минимуме между 2-м и 3-м пиками (05:58:00 UTC) поле достигает локального максимума 580 Гс и начинает ослабевать со скоростью  $\Delta B / \Delta t = -7$  Гс/с. В максимуме всплеска (3-й пик, 05:58:45 UTC) поле наименьшее ( $B = 280$  Гс) и после его прохождения опять начинает расти со скоростью  $\Delta B / \Delta t = 3.6$  Гс/с в

течение 3 мин, достигая в конце  $\sim 1020$  Гс. Таким образом, в каждом пике всплеска поле уменьшается, а на фазе спада интенсивности пика растет, причем скорость этих изменений варьируется от единиц до десяти Гс/с.



**Рис. 1.** Изменение магнитного поля в ходе всплещного процесса 20 января 2022 г.



**Рис. 2.** Изменение магнитного поля в ходе всплещного процесса 16 июля 2023 г.

В целом характер изменения магнитного поля для всплещки 16 июля 2023 года (рис. 2) похож на динамику поля в радиоисточнике всплещки 20.01.2022. По крайней мере, это проявляется для двух наиболее интенсивных пиков излучения. Для первого пика (08:24:08 UTC) на фазе роста поле слегка уменьшается от 84 до 78 Гс, а на фазе спада увеличивается. Наиболее заметно это уменьшение поля на фазе роста проявилось для второго пика (08:24:39–08:24:46 UTC): поле сначала уменьшается от 84 до 51 Гс, а

затем увеличивается до 83 Гс. На фазе спада третьего пика (08:25:41 UTC) поле быстро увеличивается и достигает 147 Гс. В общем, после главного пика вспышки поле выросло в три раза, а средняя скорость его изменения составила  $\Delta B / \Delta t = 1.2$  Гс/с.

Таким образом, для обеих вспышек имеют место значительные изменения магнитного поля в области максимальной яркости радиоисточника. На фазе роста основных пиков излучения магнитное поле уменьшается, а на фазе спада, наоборот, увеличивается. Мы считаем, что возможны, по крайней мере, две причины таких изменений.

Первая заключается в том, что обнаруженные изменения являются реальными изменениями поля в некотором локальном фиксированном объеме области вспышки. Высокая скорость изменения поля, согласно закону Фарадея, должна приводить к генерации очень сильного электрического поля, и соответственно к мощному ускорению частиц и разогреву плазмы вне зависимости от того, уменьшается поле или увеличивается.

Вторая возможная причина заключается в том, что имеет место некоторое неразрешенное радиогелиографом перемещение центра яркости радиоисточника из области с более сильным магнитным полем в область с более слабым и наоборот.

Такое перемещение центра яркости может быть связано с двумя или больше нестационарными источниками излучения в пределах диаграммы направленности радиогелиографа. Если яркость этих источников изменяется во времени несинхронно, возникающее при этом перераспределение радиояркости между радиоисточниками с отличающимся по величине магнитным полем может восприниматься как изменяющееся во времени магнитное поле в одиночном источнике.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-12-00308.

### Литература

1. *Fleishman G.D., Melnikov V.F.* Gyrosynchrotron emission from anisotropic electron distribution // *Astrophys. J.* 2003. Vol. 587. no. 2. P. 823–835.
2. *Fleishman G.D., Kuznetsov A.A.* Fast gyrosynchrotron codes // *Astrophys. J.* 2010. Vol. 721, no. 2. P. 1127–1141.
3. *Fleishman G.D., Gary D.E., Chen B., et al.* Decay of the coronal magnetic field can release sufficient energy to power a solar flare // *Science*. 2020. Vol. 367, no. 6475. P. 278–280.
4. *Fleishman G.D., Nita G.M., Chen B., et al.* Solar flare accelerates nearly all electrons in a large coronal volume // *Nature*. 2022. Vol. 606. P. 674–677.
5. *Смирнов Д.А., Мельников В.Ф.* Микроволновая диагностика вспышечной плазмы методом фитирования по данным Сибирского радиогелиографа // *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 3. С. 27–39.