

ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК МЕТОДАМИ МИКРОВОЛНОВОЙ ДИАГНОСТИКИ

Д.А. Смирнов^{1,2}, В.Ф. Мельников^{1,2}

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия,
astronom.v.cube@gmail.com

²Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижегород, Россия

STUDYING SOLAR FLARES BY MICROWAVE DIAGNOSTICS METHODS

D.A. Smirnov^{1,2}, V.F. Melnikov^{1,2}

¹Pulkovo Observatory of Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia,
astronom.v.cube@gmail.com

²National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

Аннотация. В данной работе проведена радиодиагностика солнечных вспышек 20 января 2022 г. и 16 июля 2023 г., зарегистрированных Сибирским радиогелиографом в диапазонах 3–6 ГГц и 6–12 ГГц, по данным частотного спектра излучения в максимуме яркости радиоисточников. Установлено, что на фазе роста основных пиков излучения магнитное поле уменьшается, а на фазе спада – увеличивается.

Ключевые слова: солнечные вспышки, радиогелиограф, радиодиагностика.

Abstract. In this study, the radio diagnostics of solar flares recorded by the Siberian Radio Heliograph on January 20, 2022 and July 16, 2023 in the frequency ranges of 3–6 GHz and 6–12 GHz was conducted. The frequency spectrum of the radiation at the maximum brightness of the radio sources was analyzed. It was found that the magnetic field decreased during the rise phase of the main radiation peaks and increased during the decay phase.

Keywords: solar flares, radioheliograph, radio diagnostics

ВВЕДЕНИЕ

Развитие методов радиодиагностики солнечных вспышек является актуальной темой, так как они позволяют получать уникальную информацию о корональном магнитном поле и электронах умеренно релятивистских энергий. Исследование динамики магнитного поля в корональных радиоисточниках важно для понимания процессов диссипации энергии и ускорения частиц во время вспышек.

ОТБОР СОБЫТИЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ

Для радиодиагностики были выбраны два события солнечных вспышек, зафиксированных на Сибирском радиогелиографе (СРГ), с учетом следующих критериев: наличие одного или нескольких четко выраженных максимумов на временном профиле интегральной плотности потока излучения, четко различимые фазы роста и спада, достаточная длительность всплеска для анализа динамики параметров, и приемлемое качество радиокарт, синтезируемых на основе данных СРГ.

Вспышка 20 января 2022 г. в активной области NOAA №12929 имела GOES класс M5.5 и наблюдалась в диапазоне частот 6–12 ГГц. Радиовсплеск, продолжавшийся около 15 мин, включал по крайней мере три наложенных друг на друга пика излучения. Для радиодиагностики были выбраны 8 моментов времени: 4 для максимумов всплеска, 2 для фаз роста и 2 для фаз спада плотности потока излучения.

Вспышка 16 июля 2023 г. в активной области NOAA №13372 имела GOES класс M1.1 и наблюдалась в диапазоне частот 3–12 ГГц. Этот радиовсплеск длился около 2.5 мин и также включал несколько пиков излучения длительностью 30–50 сек каждый. Для

радиодиагностики были выбраны 10 моментов времени: 3 для максимумов всплеска, 4 для фаз роста и 3 для фаз спада.

МЕТОД ПРОВЕДЕНИЯ РАДИОДИАГНОСТИКИ

Разработанный алгоритм проведения радиодиагностики заключается в подгонке теоретических значений интенсивностей гиротронного излучения, рассчитываемых с помощью FastGS Codes [Fleishman, Kuznetsov, 2010], к наблюдаемым значениям.

Математически задачу подбора параметров для фитирования можно описать как минимизацию функционала, записываемого следующим образом:

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

где I_L и I_R – интенсивность левополяризованного и правополяризованного теоретически рассчитываемого излучения, $I_{L_{obs}}$ и $I_{R_{obs}}$ – интенсивность левополяризованного и правополяризованного наблюдаемого в источнике излучения, x_1, x_2, \dots, x_n – значения параметров среды внутри радиоисточника.

Так как подобный функционал имеет из-за его сложной формы в многомерном пространстве параметров невозможно минимизировать стандартными подходами, нами использовалась [Смирнов и др., 2022] концепция генетического алгоритма минимизации, предложенная в работе [Morgachev et al., 2014].

При этом значение функционала при минимизации может перестанет снижаться, что может быть связано как с нахождением истинного решения и наименьшего значения расчетной функции, так и с нахождением максимально правильного решения в

рамках существующих погрешностей измерений наблюдаемого частотного спектра радиоизлучения.

ПОДГОТОВКА ДАННЫХ И ПОЛУЧЕНИЕ СПЕКТРОВ

Был проведен синтез радиоизображений на каждой частоте с использованием ПО, разработанного в ИСЗФ СО РАН, включая выравнивание изображений в R и L поляризациях путем минимизации линейных наклонов фаз антенн и ручной подгонки. Затем проведена калибровка яркостной температуры всего изображения Солнца, основанная на наиболее часто встречаемом значении в спокойных областях и сопоставлении с эталонными значениями [Zirin et al., 1991]. Далее изображения на разных частотах выравнивались относительно стабильного локального радиоисточника, такого как компактный гирорезонансный микроволновый источник над солнечным пятном, чтобы обеспечить точность восстановления параметров вспышечной плазмы и энергичных электронов для одной и той же области.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ РАДИОДИАГНОСТИКИ

С достаточной точностью были восстановлены параметры: напряженность магнитного поля B , угол между направлением магнитного поля и луча зрения θ , показатель энергетического спектра δ_1 в одно-степенных распределениях электронов $N(E) = AE^{-\delta_1}$.

Значения восстановленных параметров приведены в табл. 1. Для вспышки 20.01.2022 г. параметры θ и δ_1 сильно варьируются со временем, магнитное поле достигает значений $B \sim 1000$ Гс. Для вспышки 16.07.2023 г. максимальная величина магнитного поля меньше на порядок, а сильных изменений параметров θ и δ_1 зафиксировано не было.

Таблица 1.

Восстановленные параметры для вспышек 20.01.2022 г. и 16.07.2023 г.

Вспышка 20.01.2022 г.			
Время, UTC	B , Гаусс	θ , град	δ_1
05:55:30	994	92	22.1
05:56:30	361	105	10.2
05:57:30	468	124	9.9
05:58:00	581	119	8.8
05:58:45	282	113	8.5
05:59:45	438	116	9.7
06:00:45	614	130	10.1
06:02:00	1017	174	10.8

Вспышка 16.07.2023 г.			
Время, UTC	B , Гаусс	θ , град	δ_1
08:23:51	84	135	4.97
08:24:00	79	143	4.78
08:24:08	78	132	4.97
08:24:13	84	137	3.95
08:24:20	78	139	4.26
08:24:39	51	137	3.99
08:24:46	70	136	4.28
08:25:41	83	126	4.60
08:25:45	104	130	4.30
08:26:00	147	130	3.98

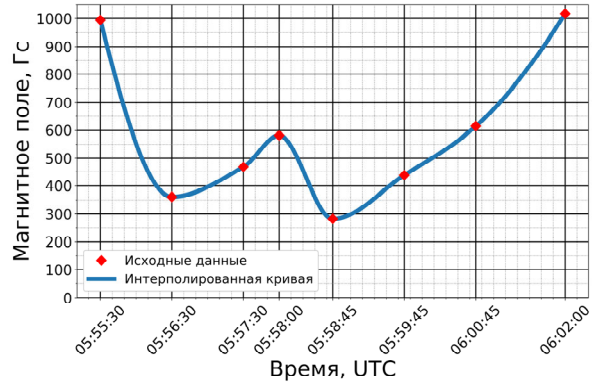


Рис. 1. График изменения величины магнитного поля в ходе вспышки 20 января 2022 г.

Из табл. 1 и рис. 1 можно видеть, что в первые минуты вспышки 20 января 2022 г. наблюдается снижение магнитного поля с ~ 990 Гс до ~ 360 Гс. Затем, после прохождения первого пика (05:56:30 UTC), поле начинает расти. В минимуме между 2-м и 3-м пиком (05:58:00 UTC) поле достигает локального максимума 580 Гс и начинает уменьшаться. В максимуме всплеска (третий пик, момент 05:58:45 UTC) поле принимает наименьшее значение ($B = 282$ Гс) и после его прохождения опять начинает увеличиваться в течение 3 минут, достигая в конце значения $B \sim 1020$ Гс.

Из табл. 1 и рис. 2 видно, что для вспышки 16 июля 2023 года у первого пика ($t_{max} = 08:24:08$ UTC) на фазе роста поле слегка уменьшается (с 84 Гс до 78 Гс), а на фазе спада увеличивается. Наиболее заметно это уменьшение поля на фазе роста проявилось для второго пика ($t_{max} = 08:24:39 - 08:24:46$ UTC): поле сначала уменьшается с 84 Гс до 51 Гс, а затем увеличивается до 83 Гс. На фазе спада третьего пика ($t_{max} = 08:25:41$ UTC) поле быстро увеличивается до 147 Гс. После главного пика вспышки, поле выросло в 3 раза.

Таким образом, наблюдается следующая закономерность. В каждом пике всплеска поле уменьшается, а на фазе спада интенсивности пика, поле увеличивается, причем скорость этих изменений варьируется от единиц Гс/с до десяти Гс/с.

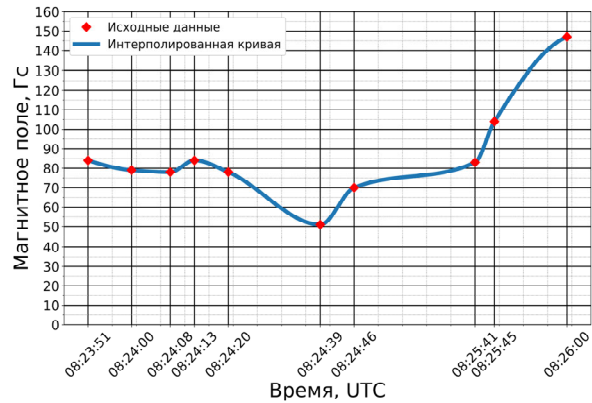


Рис. 2. График изменения величины магнитного поля в ходе вспышки 16 июля 2023 г.

Можно предложить, по крайней мере, две причины обнаруженных изменений поля: 1) реальные изменения поля в некотором локальном фиксированном объеме области вспышки; 2) перераспределение концентрации излучающих электронов из области вблизи оснований петли в ее вершину, где магнитное поле меньше, а затем возвращение в основания.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Смирнов Д.А., Моргачев А.С., Мельников В.Ф. Развитие метода автоматизированной радиодиагностики

динамики магнитного поля во вспышечных петлях Солнца для применения к многочастотным наблюдениям // Труды XXVI научной конференции по радиофизике, посвященной 120-летию М.Т. Греховой (Нижний Новгород, 12 - 27 мая 2022 г. ННГУ им. Н.И. Лобачевского). СС.183-186, 2022 г.

Morgachev A.S., Kuznetsov S.A., Melnikov V.F. Radio Diagnostics of the Solar Flaring Loop Parameters by Direct Fitting Method // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2014. V. 54, N. 7. P. 933–942.

Zirin H., Baumert B.M., Hurford G.J. The Microwave Brightness Temperature Spectrum of the Quiet Sun // *The Astrophysical Journal*. 1991. V. 370. P. 779–783. DOI: 10.1086/169861