Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 156–158.

УДК: 523.98
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-156
ORCID: 0000-0003-2990-1390

ДОЛГОЖИВУЩИЕ РАДИОИСТОЧНИКИ НА ЧАСТОТЕ 23 ГГЦ ПО ДАННЫМ СРГ: АНАЛИЗ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Феденёв В.В.[1], Анфиногентов С.А.[1]

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

LONG-LIVING RADIOSOURCES AT 23 GHZ IN SRH DATA: ACTIVE REGION MAGNETIC STRUCTURE ANALYSIS

Fedenev V.V.[1], Anfinogentov S.A.[1]

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

Аннотация. Работа посвящена поиску долгоживущих гирорезонансных источников на частоте 23 ГГц по данным Сибирского радиогелиографа (СРГ). С помощью алгоритма, основанного на анализе яркостной температуры и размеров источников, выявлено девять активных областей, сопровождающихся мощными вспышками классов M и X. В частности, для области AR 13784 показано, что наблюдаемое излучение соответствует 3-й гармонике гирочастоты при значении магнитного поля ~2700 Гс на высоте 2 Мм. Полученные результаты демонстрируют возможности СРГ по оценке магнитного поля активных областей и могут быть использованы в системах оперативного прогнозирования солнечной активности.

Ключевые слова: активные области, гирорезонансное излучение, магнитное поле Солнца, радиоизлучение, Сибирский радиогелиограф

Abstract. This study presents the search for long-living gyroresonant radio sources at 23 GHz using the Siberian Radioheliograph (SRH) data. Using the algorithm based on analysis of brightness temperature and source sizes, we identified 9 active regions associated with M- and X-class flares. In particular, the emission in AR 13784 was shown to correspond to the 3rd gyroharmonic, indicating a magnetic field of ~2700 G at an altitude of 2 Mm. These results demonstrate the capability of SRH for magnetic field estimates in active regions and highlight its ability for integration into real-time space weather forecasting systems.

Keywords: active regions, gyroresonance, solar magnetic field, radio emission, Siberian Radioheliograph**.**

ВВЕДЕНИЕ

Гирорезонансное (ГР) излучение представляет собой циклотронное излучение свободных заряженных частиц, движущихся во внешнем магнитном поле на тепловых скоростях. Циклотронная частота ГР-излучения определяется соотношением $\omega_B = eB / (m_e c)$, $f = s\omega_B$, где e и m_e — заряд и масса электрона, B — магнитное поле, $s = 1, 2, 3, \ldots$ — номер гармоники излучения. ГР-излучение в солнечной короне наблюдается в активных областях (на частотах от единиц до десятков ГГц) и распространяется в виде двух основных мод: обыкновенной (O-мода) и необыкновенной (X-мода). Наибольший вклад в наблюдаемое ГР-излучение вносит последний оптически толстый гироуровень, расположенный по лучу зрения. Таблица 1 показывает значения магнитного поля для различных гармоник гирорезонансного излучения на частоте 23 ГГц.

Таблица 1. Значения модуля магнитного поля, рассчитанные для частоты гирорезонансного излучения 23 ГГц

s	$\lvert B \rvert$, Гс	Формула	Мода излучения
2	4108	$B_o = \frac{2\pi f m_e c}{2e}$	обыкновенная
3	2739	$B_e = \frac{2\pi f m_e c}{3e}$	необыкновенная
4	2054	$B = \frac{2\pi f m_e c}{4e}$	необыкновенная

Прямое измерение полного вектора магнитного поля **B** выполняется только на уровне фотосферы с помощью оптических инструментов, а для получения информации о поле в короне необходимы высокое пространственное разрешение (не более 1") и 3D-моделирование магнитного поля в приближении нелинейного бессилового поля (NLFFF) . Поиск и последующий анализ микроволновых спектров ГР-источников предоставляет возможность оценки модуля магнитного поля в нижней короне, при условии того, что правильно определены излучающие гармоники.

На основе данных радиогелиографа Нобеяма на частоте 34 ГГц за период с 1995 по 2018 г. были найдены 27 активных областей (АО) с ГР-источниками на частоте 34 ГГц [Fedenev et al., 2023]. Основные характеристики выявленных источников:

1. Большая часть обнаруженных источников обладает компактными размерами (до 10 лепестков диаграммы направленности инструмента по площади).

2. В 17 из 27 активных областей за время их существования наблюдались вспышки класса ≥ X.

3. Часть найденных источников идентифицированы как источники над нейтральной линией (NLS).

Сибирский радиогелиограф (СРГ) [Алтынцев и др., 2020], работающий в Бадарах и запущенный на всем частотном диапазоне 3–24 ГГц в конце 2023 г., по сравнению с Нобеямой обладает существенными преимуществами :

1. 48 частот в двух круговых поляризациях.

2. Возможность определения механизма излучения через спектральный анализ в широком диапазоне частот.

3. Высокое временное разрешение: 3–3.5 с на одной частоте, до 0.2 с между соседними частотами.

МЕТОДИКА ПОИСКА ИСТОЧНИКОВ

Основной целью работы был поиск активных областей, содержащих яркие гирорезонансные источники на частоте 23 ГГц. Выбор частоты на верхней границе частотного диапазона обусловлен возможностью выявить более сильные магнитные поля, если подтвержден ГР-механизм излучения (см. табл. 1).

Для поиска источников были выбраны следующие критерии отбора:

1) время жизни источника сравнимо с временем жизни соответствующей активной области (несколько дней и более);

2) размеры источника не более нескольких лепестков диаграммы направленности СРГ;

3) возможные номера гармоник излучения: 2, 3, 4.

Для корректной идентификации ГР-источников важна оценка яркостной температуры излучения и размеров источников относительно диаграммы направленности телескопа. Наблюдаемая яркостная температура T_{obs} связана с истинной температурой источника T_{s} соотношением: $T_{\mathrm{obs}} = T_{\mathrm{s}} \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{obs}}\right)^2 = T_{\mathrm{s}}\left(1 - \frac{\sigma_\Delta^2}{\sigma_\Delta^2 + \sigma_s^2}\right)$, где σ_s — реальный размер источника, σ_Δ — ширина диаграммы направленности СРГ (около 5″ на 23 ГГц), σ_{obs} — наблюдаемый размер источника.

При заданной диаграмме направленности $\sigma_\Delta \approx 5''$ можно определить пороговое значение яркостной температуры, при котором источник можно считать ГР. Для корональной температуры 1 МК наблюдаемый порог составляет 0.15×10^6 K.

Алгоритм построения каталога был реализован через последовательную фильтрацию:

1. Пороговая фильтрация по максимальной яркостной температуре (минимум четыре изображения в день должны превысить порог).

2. Исключение источников, яркость которых большую часть наблюдательного дня поддерживается ниже порога и повышается только вследствие вспышек.

3. Анализ размеров источников, анализ спектров.

Для получения изображений использовался алгоритм калибровки и синтеза радиоизображений [https://git.iszf.irk.ru/anfinogentov/srh48_api/] и система параллельных вычислений [https://git.iszf.irk.ru/fedenev/srhimages].

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКА

В результате обработки данных СРГ за период 2024–2025 гг. найдено как минимум 26 наблюдательных дней, в которые наблюдалось яркое ГР-излучение, был составлен список из девяти уникальных активных областей с яркими ГР-источниками (см. таб. 2).

Таблица 2. Основные параметры обнаруженных событий

N	AO	Дата	Макс. класс вспышки
1	13615	2024-03-23	M1.9
2	13663	2024-05-03 по 07	X4.5
3	13664	2024-05-03 по 13	X8.7
4	13697	2024-05-31, 06-01	M3.2
5	13784	2024-08-10 по 20	X1.1
6	13848	2024-10-11 по 13	X1.8
7	13876	2024-10-29	C7.9
8	14055	2025-04-13, 14	M4.2
9	14087	2025-05-14	C2.7

Особый интерес представляет анализ активной области AR13784 (см. рис. 1 и 2), где источник наблюдается достаточно долгое время (10–20 августа 2024 г.), магнитное поле на фотосфере составляет 3960 Гс, а также наблюдались вспышки класса ≥ X. Восстановленное магнитное поле в потенциальном приближении [Nita et al., 2015] на высоте 2 Мм составляет 2700 Гс, что соответствует 3-й гармонике циклотронной частоты и необыкновенной моде. Размер источника в интенсивности по площади составил от 2 до 4 диаграмм направленности СРГ.

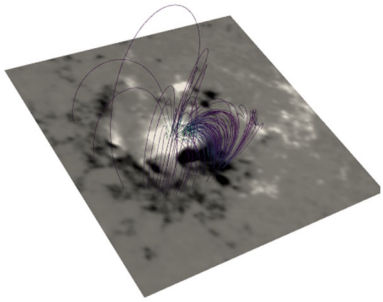

Рис. 1. Силовые линии магнитного поля в потенциальном приближении, восстановленные с граничных условий на фотосфере, для AR13784

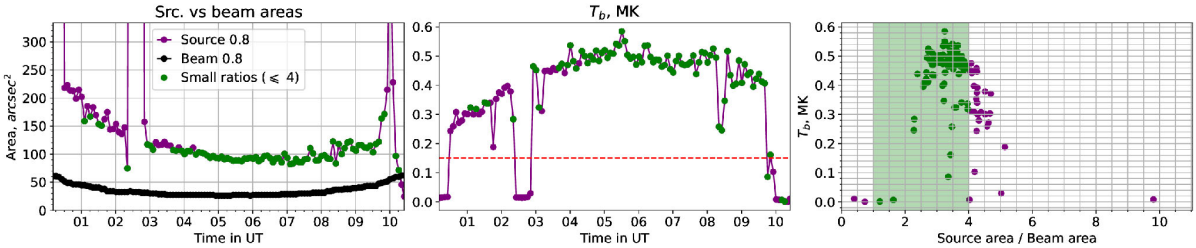

Рис. 2. Размеры ГР-источника (AR13784) и его максимальная яркостная температура на частоте 23 ГГц в течение наблюдательного дня

Основным результатом работы является то, что в большинстве обнаруженных активных областей происходили вспышки М-и Х-классов. Все активные области обладают магнитными полями выше 2000 Гс, что соответствует критериям появления ярких компактных микроволновых источников с яркостными температурами в сотни тысяч кельвин. Критерии поиска и выявления подобных источников возможно применять в оперативных прогнозах, планируется также дополнение каталога.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алтынцев А., Лесовой С., Глоба М. и др. Многоволновой Сибирский радиогелиограф // Солнечно-земная физика. 2020. Том 6, № 2. С. 30–40.

Nita G.M., Fleishman G.D., Kuznetsov A.A., et al. Three-dimensional radio and X-ray modeling and data analysis software: Revealing flare complexity // Astrophys. J. 2015. V. 799, N 2. P. 236.

Fedenev V.V., Anfinogentov S.A., Fleishman G.D. Strongest coronal magnetic fields in solar cycles 23 and 24: Probing, statistics and implications // Astrophys. J. 2023. V. 943, N 2. P. 160.

URL: https://git.iszf.irk.ru/anfinogentov/srh48_api/ (дата обращения 27.05.2026).

URL: https://git.iszf.irk.ru/fedenev/srhimages (дата обращения 27.05.2026).