ИСТОЧНИКИ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ НАД НЕЙТРАЛЬНОЙ ЛИНИЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Зайцев В.В.

*Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН
г. Нижний Новгород, Россия*

SOURCES OF MICROWAVE EMISSION ASSOCIATED WITH THE MAGNETIC FIELD NEUTRAL LINE

Zaitsev V.V.

*Federal research center Institute of Applied Physics of RAS,
Nizhny Novgorod, Russia*

The main properties of microwave emission sources above the magnetic field neutral line, which follow from the assumption of the gyrosynchrotron radio emission mechanism, are considered. The intense event of September 3–5, 2017, resulted in a series of powerful flares, is studied as an example. A possible cause of the continuous acceleration of electrons in the case of the gyrosynchrotron mechanism implementation, as well as the conditions under which the gyrosynchrotron mechanism of microwave emission does not play a significant role in the neutral line sources origin are discussed.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-183-188

1. Введение

В микроволновом излучении Солнца иногда наблюдаются так называемые источники, располагающиеся в короне между пятнами над нейтральной линией вертикальной компоненты магнитного поля (NLS). Эти источники появляются обычно за 1–2 дня перед мощными вспышками и имеют длительность порядка нескольких дней. В отличие от S-компоненты, NLS более компактны (размеры порядка 10 секунд), имеют умеренную циркулярную поляризацию (около 30%) и по данным РАТАН-600 показывают яркостную температуру в пределах от 10^5 до 10^7 K, которая, возможно, ограничена разрешающей способностью инструмента и, в принципе, может быть несколько выше. Свойства источников над нейтральной линией исследовались в целом ряде работ [1, 2], в частности, с использованием многооктавного спектрально-поляризационного комплекса высокого разрешения на РАТАН-600. Относительно механизма генерации излучения таких источников нет однозначной точки зрения. Рассматривались как о тепловая [3], так и нетепловая [4] природа радиоизлучения.

В настоящей работе на примере интенсивного события 3–5 сентября 2017 года [2], за которым последовал ряд мощных вспышек, мы рассмотрим основные свойства источника над нейтральной линией, которые выте-

кают из предположения о гиротронном механизме радиоизлучения. Мы рассмотрим также возможную причину непрерывного ускорения электронов в случае реализации гиротронного механизма.

2. Событие 3–5 сентября 2017 года

Источник микроволнового излучения над нейтральной линией начал формироваться 3 сентября в активной области NOAA 12673. Излучение 3 сентября было относительно слабым, однако 4 и 5 сентября его интенсивность возросла приблизительно на порядок. Наблюдавшиеся спектры микроволнового излучения источников над нейтральной линией 3, 4 и 5 сентября 2017 года приведены на рис. 1 из работы Боровик и др. [2] и имеют признаки спектров гиротронного излучения: поток радиоизлучения вначале растет с увеличением частоты, достигает максимума, затем падает приблизительно по степенному закону при дальнейшем увеличении частоты (см. верхние спектры на среднем и правом фрагментах рис. 1).

Рис. 1.

Спектральный индекс α для диапазона длин волн 2–4 см, в котором излучение считаем оптически тонким, частота максимума ν_m (Гц), поток радиоизлучения в максимуме (на частоте 10 ГГц) и степень поляризации r_c на волне 2, 35 см имели следующие значения: $\alpha = -0,81; -1,87; -1,32$, ν_m (Гц) = $3,3 \cdot 10^9; 6,6 \cdot 10^9; 6,6 \cdot 10^9$, F_{ν}^{max} (эрг/см²сек Гц) = $3 \cdot 10^{-19}; 3,3 \cdot 10^{-18}; 3,35 \cdot 10^{-18}$, $r_c \approx 30\%$ для 3, 4 и 5 сентября, соответственно.

3. Модель источника

Будем предполагать, что источником микроволнового излучения над нейтральной линией являются корональные магнитные петли, соединяющие различные участки активной области NOAA 12673 противоположной полярности, расположенные по обе стороны нейтральной линии, как это схематически показано на рис. 2.

Идея корональных магнитных петель как источников радиоизлучения привлекательна тем, что в корональных петлях реализуется постоянный механизм накачки их объемов энергичными электронами вследствие гене-

рации индукционных электрических полей при колебаниях электрического тока [5], в результате чего поддерживается длительная генерация интенсивного радиоизлучения. В предположении гиросинхротронного механизма радиоизлучения из оптически тонкого источника (диапазон длин волн

Рис. 2.

2–4 см) и для степенного распределения энергичных электронов с показателем энергетического спектра δ поток радиоизлучения F_ν , частоту максимума ν_{peak} и степени поляризации r_c можно приближенно представить в виде [6]

$$F_\nu = 3.3 \cdot 10^{-24} 10^{-0.52\delta} (\sin\vartheta)^{-0.43+0.65\delta} \left(\frac{\nu}{\nu_B}\right)^{1.22-0.90\delta} (n_e d) B \frac{s}{R^2} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \text{сек}} \text{Гц}, \quad (1)$$

$$\nu_{peak} = 2.72 \times 10^3 10^{0.27\delta} (\sin\vartheta)^{0.41+0.03\delta} (n_e d)^{0.32-0.03\delta} B^{0.68+0.03\delta}, \quad (2)$$

$$r_c = 1.26 \cdot 10^{0.035\delta} 10^{-0.071\cos\vartheta} \left(\frac{\nu}{\nu_B}\right)^{-0.782+0.545\cos\vartheta}. \quad (3)$$

Формулы (1)–(3) справедливы в интервале углов $\vartheta = 20^\circ - 80^\circ$ и для оптической толщины $\tau_\nu = \kappa_\nu d < 1$, где

$$\kappa_\nu = 1.4 \times 10^{-9-0.22\delta} (\sin\vartheta)^{-0.09+0.72\delta} \left(\frac{\nu}{\nu_B}\right)^{-1.30-0.98\delta} \frac{n_e}{B}. \quad (4)$$

Формула (1) позволяет по спектральному индексу оптически тонкого радиоизлучения из соотношения $\alpha = 1.22 - 0.90\delta$ определить показатель спектра энергичных электронов, откуда находим $\delta = 2,25; 3,40; 2,82$ для 3; 4; и 5 сентября 2017 г., соответственно. Полагая $\vartheta \approx 80^\circ$, что достаточно вероятно для рассматриваемой модели источника, из формулы (3) для степени круговой поляризации на волне 2,35 см ($\nu = 1,28 \cdot 10^{10}$ Гц) можно

определить магнитное поле в корональных магнитных петлях – источниках гиротронного излучения: $B = 4,5 \cdot 10^2$; $4 \cdot 10^2$; $3,8 \cdot 10^2$ Г для 3; 4; и 5 сентября 2017 г., соответственно. Имеет место тенденция уменьшения напряженности магнитного поля в петлях со временем. Полученные значения магнитного поля и показателя спектра энергичных электронов позволяют по частоте максимума спектра (2) определить величину $n_e d$ – произведение концентрации энергичных электронов на толщину источника. Используя данные для частоты максимума в различные дни и соответствующие значения магнитных полей, получим $n_e d = 10^{14} \text{ см}^{-2}$; $5,8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$; $3,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ для периодов 3; 4; и 5 сентября 2017 г., соответственно. Для оценки площади источника над нейтральной линией в различные дни воспользуемся данными для потоков на частоте 10 ГГц, для которой мы считаем источник оптически тонким, а также формулой (1) и определенными выше значениями $n_e d$ и магнитного поля. В результате получим площади источника $S = 3,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^2$ (3 сентября); $3,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^2$ (4 сентября); 10^{17} см^2 (5 сентября), а также соответствующие значения яркостной температуры микроволнового излучения на частоте 10 ГГц: $T_b = 5,6 \cdot 10^8 \text{ К}$ (3 сентября); $1,7 \cdot 10^8 \text{ К}$ (4 сентября); $6 \cdot 10^8 \text{ К}$ (5 сентября). Оцененные значения яркостных температур значительно превышают яркостные температуры локальных источников над пятнами. Это связано, в первую очередь, с меньшей площадью источника над нейтральной линией и различиями в величине потоков радиоизлучения.

4. Происхождение энергичных электронов

Конвективные потоки фотосферной плазмы, взаимодействуя с магнитным полем в основаниях петли, генерируют внутри петли электрический ток, который течет от одного основания петли через корональную часть к другому основанию и замыкается вблизи фотосферы или внутри нее, где проводимость становится изотропной. Таким образом, магнитная петля с фотосферным токовым каналом представляет собой эквивалентный электрический контур, собственная частота которого зависит от величины постоянной составляющей электрического тока I_0 . С колебаниями электрического тока в контуре связаны колебания азимутальной компоненты магнитного поля в магнитной петле. Эти колебания, в свою очередь, приводят к генерации направленного вдоль оси трубки электрического поля. Это электрическое поле параллельно компоненте магнитного поля B_z вдоль оси петли, поэтому оно будет ускорять частицы. Оценки для приведенных выше параметров источника 4 сентября 2017 года показывают, что при токах $I_0 = 10^8 \text{ А}$ автоколебания сопровождаются генерацией индукционных электрических полей напряженностью $E_z = 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ В/см}$. В таком элек-

трическом поле электроны на масштабе петли длиной $l \approx 5 \cdot 10^9$ см приобретают энергию 200 keV. При этом стационарная концентрации энергичных электронов зависит от отношения поля Драйзера $E_D = 6 \times 10^{-8} n/T$ в/см к ускоряющему полю E к и от скорости диффузии частиц в конус потерь (здесь n и T – концентрация и температура основной плазмы в магнитной петле). В нашем случае отношение $E_D/E \approx 30$, что приводит к значениям концентрации энергичных электронов $n_e \approx 2 \cdot 10^8$ см⁻³.

5. Выводы

В рамках гиросинхротронного механизма радиоизлучения удастся по параметрам наблюдаемого спектра самосогласованно определить эффективную площадь источника, магнитное поле, концентрацию и показатель спектра энергичных электронов, а также яркостную температуру излучения. Мы предполагаем, что источник сосредоточен в вершинах магнитных петель, соединяющих различные участки активной области NOAA 12673 противоположной полярности, расположенные по обе стороны нейтральной линии. Такие петли могли начать формироваться за 1–2 дня до начала вспышечного процесса в результате усиления фотосферной конвекции вблизи нейтральной линии. Об этом свидетельствуют потоки плазмы в нижней атмосфере с амплитудами скоростей больше 3 км/сек, которые наблюдались вблизи нейтральной линии во время мощной вспышки 6 сентября 2017 года [7]. Эти значения скорости приблизительно на порядок превышают средние скорости фотосферной конвекции в спокойные периоды. С формированием магнитных петель может быть связано наблюдаемое перед вспышками усиление градиента магнитного поля [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 17- 02- 00091_a (разделы 3,4), № 19 – 02 - 00704_a (разделы 2,4)), программы фундаментальных исследований РАН 12 «Вопросы происхождения и эволюции Вселенной» (раздел 4), госзадания (разделы 1–4, тема 0035-2019-0002), Гранта РНФ № 16-12-10528 (раздел 3).

Литература

1. *Abramov-Maximov, V.E., Borovik, V.N., Opeikina, L.V., et al.* // Geomagnetism and Aeronomy, 2017, vol. 57, No. 8, pp. 978–987. doi 10.1134/S0016793217080023.
2. *Боровик, В.Н., Абрамов-Максимов, В.Е., Тлатов, А.Г., и др.* // Известия Крымской Астрофизической обсерватории, 2018, Т. 114, № 1, с. 89–94.
3. *Yasnov, L.V.* // Solar Physics, 2014, vol. 289, Issue 4, pp 1215–1225. doi <https://doi.org/10.1007/s11207-013-0396-3>.
4. *Бакунина, И.А., Мельников, В.Ф., Соловьев, А.А., Абрамов-Максимов, В.Е.* // Труды конференции «Солнечная и солнечно-земная физика – 2013», 2013, СПб, Пулково, 25–27 сентября, с. 11–14.

5. Zaitsev, V.V., Stepanov, A.V. // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2018, vol. 58, No. 7, pp. 831–830. doi 10.1134/S0016793218070265
6. Dulk G.A. // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 1985, vol. 23, pp. 169–224.
7. Sharykin, I.N., Kosovichev, A.G. // *Astrophysical Journal*, 2018, 864:86 (13 pp.), 2018.