

ИСТОЧНИК НАД НЕЙТРАЛЬНОЙ ЛИНИЕЙ В СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКЕ 23 МАРТА 2024 ГОДА

**Кудрявцева А.В.¹, Мышьяков И.И.¹,
Анфиногентов А.С.¹, Дашинамаева С.А.²**

¹*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

²*Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия*

NEUTRAL LINE ASSOCIATED SOURCES IN SOLAR FLARE ON 23 MARCH 2024

**Kudriavtseva A.V.¹, Myshyakov I.I.¹,
Anfinogentov S.A.¹, Dashinimaeva S.A.²**

¹*Institute of solar-terrestrial physics SB RAS, Irkutsk, Russia*

²*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

We analyzed the existence of Neutral Line associated Sources (NLS) before the solar flare X1.1 on March 23, 2024. A Neutral Line associated Sources are the compact microwave sources of radiation that are projected into the region of the photospheric magnetic field neutral line. Such sources can be used as an indicator of powerful solar flares since they are often observed in the active region structure several hours or days before the flare. The flare X1.1 on March 23, 2024, was interesting because by involving in the flare process both active regions: NOAA 13614 and NOAA 13615, were connected by a trans-equatorial loop. Multi-wavelength two-dimensional data from the Siberian Radioheliograph in the range 3-24 GHz were used to detect and analyze the NLS in the active region. The identification of NLS occurs by comparing radio maps with the distribution of the magnetic field. Therefore the two-dimensionality of observations in a wide frequency range allows us to identify unambiguous the radio sources position. The existence of NLS was confirmed for the active region 13615 one day before the flare. A spectral analysis of the observed radio sources also was done.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-197-200>

Введение

Еще в 1970-х годах было отмечено, что солнечным вспышкам предшествует возникновение компактного источника микроволнового излучения в активной области (АО) [5]. Такие источники были названы источниками над нейтральной линией магнитного поля (ИНЛ, или, в англоязычной литературе – Neutral Line associated Sources –NLS) по их расположению вблизи линии инверсии магнитного поля в АО. ИНЛ появляются в области наибольшего сближения солнечных пятен противоположной полярности и являются основными источниками микроволнового шума АО. Важную роль играет тот наблюдательный факт, что появление ИНЛ на высоких частотах, (например, на 17 ГГц) фиксируется в АО, производящих рентгеновские вспышки балла X [1–4, 7]. Появление ИНЛ опережает мощную вспышку или начало серии таких вспышек на время от нескольких часов до двух суток.

Для понимания механизмов их формирования и взаимосвязи со вспышками, необходимы регулярные многоволновые наблюдения Солнца с хорошим пространственным и временным разрешением. Измерения на РАТАН-600 дают информацию о спектре излучения на нескольких частотах сразу, но возникает неоднозначность позиционирования излучения, т.к. данные одномерны. Радиогелиографы Нобеля и Сибирский солнечный радиотелескоп (ССРТ) предоставляли двумерные данные, но только для одной-двух частот и не всегда могли одновременно наблюдать вспышку. С запуском Сибирского радиогелиографа (СРГ) [1, 2] появилась возможность получать двумерные изображения Солнца в диапазоне 3–24 ГГц, что открывает большие возможности для изучения природы ИНЛ.

Данные

СРГ построен на базе ССРТ и представляет собой три решетки, проводящих измерения в диапазоне 3–6, 6–12 и 12–24 ГГц, соответственно. Угловое разрешение составляет от 7" до 30" в зависимости от частоты, спектральное разрешение (ширина канала) 10 МГц, временное разрешение может достигать 0.01–0.1 в одночастотном режиме. Измеряются интенсивность и круговая поляризация (параметры Стокса I и V). Наблюдения в тестовом режиме ведутся с марта 2021, постоянные – с декабря 2023. Время наблюдений с 00 до 10 UT летом и с 02 до 08 UT зимой.

Данные о магнитном поле получены с помощью Helioseismic and Magnetic Imager (HMI/SDO), измеряющего продольное магнитное поле с временным разрешением 45 с, и получающего векторную магнитограмму с разрешением в 12 мин с точностью поляризации не менее 0.3% [6].

Наблюдения

Вспышка рентгеновского класса X1.1 произошла 23 марта 2024 года в 00:58 UT (начало вспышки) и затронула две АО, соединенные транс-экваториальной петлей. Обе АО, NOAA 13614 и NOAA 13615, появились на восточном лимбе 17 марта 2024 года и уже тогда были взаимосвязаны друг с другом очень высокими корональными петлями, что хорошо видно на изображениях в ультрафиолетовом диапазоне. АО 13615 имела сложную магнитную структуру $\beta\gamma\delta$, а АО 13514 являлась простой биполярной группой с β конфигурацией, которая сохранялась таковой до 23 марта. С самого момента появления на диске, обе АО показывали умеренную вспышечную активность в виде вспышек класса C и M.

Для обнаружения ИНЛ необходимо сопоставить радиокарты в интенсивности с распределением магнитного поля, тогда максимумы радиояркости должны располагаться вблизи нейтральной линии магнитного поля. Такое сопоставление было проведено для всех изображений, полученных СРГ в диапазоне 3–24 ГГц, с рассчитанным в потенциальном приближении распределении магнитного поля для высоты 3 Мм (рисунок).

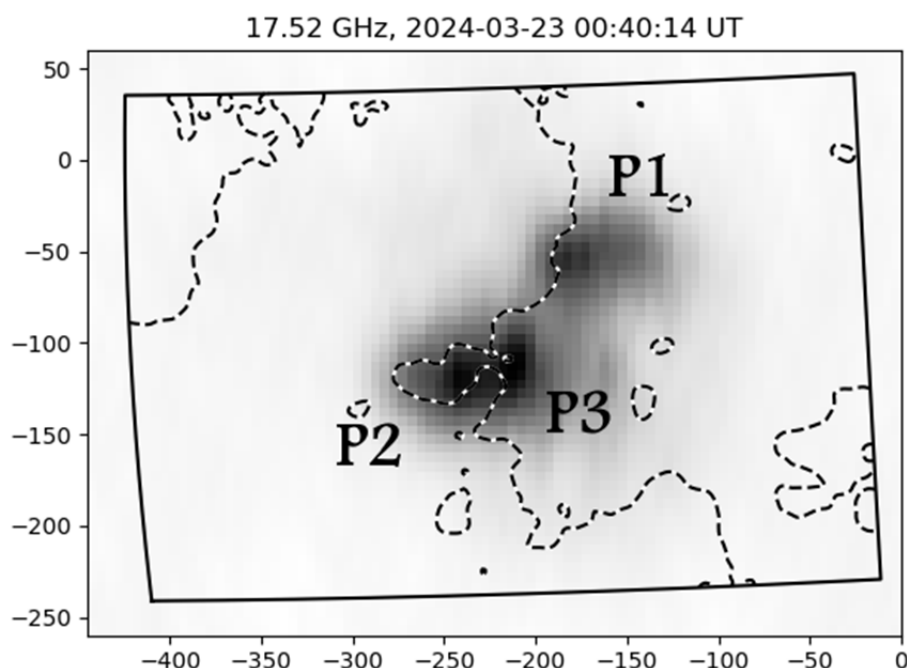


Рисунок. Радиоисточники в АО 13615 23 марта 2024 года. Полутонный фон – интенсивность (параметр Стокса I, полученный СРГ на частоте 17.52 ГГц); черно-белая линия – нейтральная линия магнитного поля на высоте 3 Мм; P1, P2 и P3 – три радиоисточника.

На рисунке можно видеть три микроволновых источника, расположенных вблизи нейтральной линии АО 13615. Радиоисточник P1 сильнее всего проявлялся на низких частотах, тогда как P2 и P3 – наоборот, на высоких. Проведенный спектральный анализ показал для P2 неравномерность левой и правой круговой поляризации с доминированием одной из них после 6 ГГц. Для P3, наоборот, обе поляризации полностью совпали. Проведенная процедура выявления ИНЛ для данных за 22 марта 2024 года показала его существование как минимум за сутки до вспышки класса X. Следует отметить, что наблюдались только радиоисточники P1 и P2, а излучение P3 было очень слабым.

В АО 13614 был обнаружен только один источник микроволнового излучения, соответствующий пятну. И единственная особенность заключается в знаке поляризации, полученном по радиоданным, отличном от знака поляризации, полученном HMI/SDO. Данное явление можно интерпретировать через существование транс-экваториальной петли, которая накрывает сверху АО 13614 и таким образом оказывается на пути луча зрения и инвертирует знак поляризации.

Заключение

Подтверждено существование ИНЛ в АО 13615 перед мощной солнечной вспышкой класса X, произошедшей 23 марта 2024 года. Сопоставление радиоданных СРГ в диапазоне 3–24 ГГц с магнитограммами SDO/HMI показало наличие ИНЛ за сутки до события.

Авторы благодарны коллективу Радиоастрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН за обеспечение наблюдения на СРГ, а также коллективу NASA/SDO за возможность использовать данные для анализа.

Результаты получены с использованием Уникальной научной установки "Сибирский радиогелиограф" [8].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Литература

1. Алтынцев А.Т., Лесовой С.В., Глоба М.В. и др. Многоволновый Сибирский радиогелиограф // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 2. С. 37–50.
2. Лесовой С.В., Алтынцев А.Т., Кочанов А.А. и др. Сибирский радиогелиограф: первые результаты // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 1. С. 3–16.
3. Abramov-Maximov V.E., Borovik V.N., Opeikina L.V., Tlatov A.G. Dynamics of microwave sources associated with the neutral line and the magnetic-field parameters of sunspots as a factor in predicting large flares // Solar Phys. 2015. Vol. 290, iss. 1. P. 53–77.
4. Bakunina I.A., Abramov-Maximov V.E., Osharin A.M. Evolution of the compact microwave inter-sunspot source before strong flare // J. Phys.: Conference Ser. 2017. Vol. 798, iss. 1, 012041.
5. Kundu M.R., Alissandrakis C.E., Bregman J.D., Hin A.C. 6 centimeter observations of solar active regions with 6" resolution // Astrophys. J. 1977. Vol. 213. P. 278–295.
6. Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I., et al. The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO) // Solar Phys. 2012. Vol. 275. P. 207–227.
7. Uralov A.M., Rudenko G.V., Rudenko I.G. 17 GHz neutral line associated sources: birth, motion, and projection effect // Publ. Astron. Soc. Japan. 2006. Vol. 58. P. 21.
8. URL: ckp-rf.ru/usu/73606 (дата обращения 23 октября 2024 г.)