

ПЕРВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЭРУПТИВНОГО ПРОТУБЕРАНЦА, ЗАРЕГИСТРИРОВАННОГО СИБИРСКИМ РАДИОГЕЛИОГРАФОМ, В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 4–8 ГГц

¹А.Ю. Федотова, ¹А.Т. Алтынцев, ¹С.В. Лесовой, ^{1,2}А.А. Кочанов

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

²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

fedotovanastya@iszf.irk.ru

FIRST OBSERVATIONS OF THE ERUPTIVE FILAMENT RECORDED BY THE SIBERIAN RADIOHELIOGRAPH IN THE RANGE OF 4–8 GHz

¹A.Yu. Fedotova, ¹A.T. Altyntsev, ¹S.V. Lesovoi, ^{1,2}A.A. Kochanov

¹Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Аннотация. Регулярные наблюдения Солнца с помощью многоволнового Сибирского радиогелиографа (СРГ) в диапазоне частот 4–8 ГГц были начаты в 2016 г. СРГ представляет собой 48-элементный Т-образный радиоинтерферометр. Изображения Солнца формируются посредством фурье-синтеза. 25 июня 2016 г. СРГ зарегистрировал эрупцию протуберанца в диапазоне частот 4–8 ГГц, который наблюдался в восточной части солнечного лимба с 01:47 UT по 03:15 UT. По данным орбитальной обсерватории SDO/AIA залимбовый протуберанец лучше всего наблюдался в каналах 171, 304, 131,335 и 094 Å. Были проведены сравнения изображений с данными LASCO.

Ключевые слова: СРГ, протуберанец, радиоинтерферометр.

Abstract. Regular observations of the Sun with multiwave the Siberian Radioheliograph (SRH-48) in frequency range of 4–8 GHz were started at 2016. SRH-48 is 48-element T-shaped radio interferometer. The images of the Sun are created via Fourier synthesis. At 25 June 2016 the SRH-48 recorded eruptive filament in the range of 4–8 GHz observed in the eastern part of solar limb from 01:47 UT to 03:15 UT. According to orbital observatory SDO/AIA the filament was well seen in the channels 171, 304, 131,335 and 094 Å. Also we compared the images with the data LASCO.

Keywords: SRH-48, filament, radio interferometer.

Введение

Тесная связь эруптивных протуберанцев и корональных выбросов хорошо прослеживается на примерах отдельных явлений и подтверждается широкой статистикой. Есть немало аргументов в пользу того, чтобы трактовать оба эти явления как две фазы единого процесса выхода из равновесия магнитного жгута [Филиппов, 2007]. Например, Subramanian and Dere показывали, что 60 % корональных выбросов массы были связаны с эруптивным волокном. Иногда, во время их подъема, эруптивные нити умеренно нагреваются (т. е. не достигают температуры вспышки). Корональные выбросы массы связаны с эруптивными волокнами, которые проявлялись либо в активных областях, либо в спокойном Солнце. Gopalswamy и др. обнаружили, что 72 % эруптивных волокон, которые они изучали, приводили к появлению корональных выбросов массы. Более того, эрупция волокон в значительной части участвовала в наблюдаемых корональных выбросах массы [Alissandrakis et al., 2013].

Условия наблюдения эруптивных явлений таковы, что, как правило, невозможно проследить за развитием процесса непрерывно – от зарождения в нижних слоях атмосферы до перехода в возмущение межпланетной среды. Наблюдения в Na начала активации волокна (протуберанца) часто обрываются очень скоро из-за выхода излучаемой линии из полосы фильтра за счет эффекта Доплера, уменьшения

эмиссии из-за падения плотности расширяющегося вещества, ионизации водорода вследствие нагрева плазмы протуберанца. Иногда более поздние этапы эволюции удается наблюдать в ультрафиолетовом или радиоизлучении, но обычно дальнейшая судьба протуберанца становится доступной для излучения, когда он достигает нижней границы поля зрения космического коронографа (–2R) и будет виден в белом свете как корональный выброс [Филиппов, 2007].

Наблюдения активных процессов на Солнце проводились с использованием Сибирского Солнечного радиотелескопа (ССРТ), который на данный момент находится в стадии модернизации. Цель модернизации — изменить принцип формирования изображения за счет вращения Земли на апертурный синтез в широком диапазоне частот — 4–8 ГГц. В настоящее время запущена первая очередь модернизированного радиотелескопа — Сибирский радиогелиограф (СРГ).

В данной работе, мы использовали регулярные наблюдения солнечной активности на уникальном многоволновом СРГ в диапазоне частот 4–8 ГГц. СРГ представляет собой 48-элементный Т-образный радиоинтерферометр. Изображения Солнца формируются посредством апертурного Фурье-синтеза [Lesovoi et al., 2012, 2014]. Один из видов данных Сибирского радиогелиографа — корреляционные кривые [badary.iszf.irk.ru/srhCorrPlot.php, ftp://badary.iszf.irk.ru/data/srh48/lightcurve]. Такого рода данные

радиогелиографов, ведущих регулярные наблюдения, очень информативны и публикуются наряду с изображениями Солнца. На данный момент, пространственное разрешение радиоинтерферометра составляет 1.0–1.5 угловых минуты, временное разрешение около 1 с, спектральное разрешение 10 МГц, чувствительность по потоку около 10^{-24} Вт·м⁻²·Гц⁻¹ или по яркостной температуре около 10^3 К. Регистрируются обе круговые поляризации (RCP, LCP).

В ходе данной работы была разработана программа построения изображений из исходных данных СРГ на высокоуровневом языке программирования Python. 25 июня 2016 г. впервые на радиогелиографе нами был зарегистрирован залимбовый эруптивный протуберанец в диапазоне частот 4–8 ГГц, который наблюдался в восточной части солнечного лимба ($E^\circ 109, N^\circ 15$) с 01:47 UT до 03:15 UT ($\sim 1R_\odot$) на пяти частотах (4.5, 5.2, 6.0, 6.8, 7.5 ГГц). Залимбовый эруптивный протуберанец демонстрировал плавное ускорение и достиг скорости ~ 400 км/с. На орбитальной обсерватории SDO/AIA залимбовый протуберанец наблюдался в каналах 171, 304, 131, 335 и 094 А. Были проведены сравнения изображений по данным SOHO/LASCO.

STEREO (Solar Terrestrial Relations Observatory) — миссия НАСА по изучению солнечной активности. Два одинаковых космических аппарата были запущены 26 октября 2006 г. на орбиты близкие к орбите движения Земли вокруг Солнца. В ходе работы один из них постепенно отстает от Земли (STEREO-B), а другой, наоборот, обгоняет ее (STEREO-A). Что дает возможность одновременно наблюдать Солнце с двух разных точек, т.е. использовать стереоскопический эффект, позволяя определить положение источника выброса на Солнце и траекторию его движения, которые невозможно определить по одиночному наблюдению с помощью коронографа у Земли, как например, в проекте SOHO. Такие наблюдения помимо того, что дают новые данные при изучении солнечной активности, способны существенно повысить точность прогнозов эффектов космической погоды и, в частности, геомагнитной активности [https://stereo.gsfc.nasa.gov].

На рис. 1 приведены текущие позиции космического корабля STEREO-A (красным цветом), STEREO-B (синим цветом), желтый круг обозначает Солнце и зеленый круг — Земля. Пунктирными линиями обозначено угловое смещение от Солнца. Когда два космических корабля приблизятся к Земле, с правой стороны появится расширенный вид области вокруг Земли в той же ориентации, что и в центре Солнца.

Ниже мы приводим пример эруптивного волокна, который был зарегистрирован Сибирским Солнечным Радиотелескопом, работающим на частоте 5730 МГц (5.2 см). На рис. 2 дана последовательность изображений с ССРТ, которые показывают классическую картину с начальным медленным ростом, за которым следует быстрый рост [Alissandrakis et al., 2013]. Яркостная температура волокна была $\sim 13\,000$ К в 06:53:22 UT, разброс до ~ 3500 К в 07:19:51 UT; обратите внимание, что из-за различного фона неба, точность этих измерений была не лучше, чем 500 К [Alissandrakis et al., 2013].

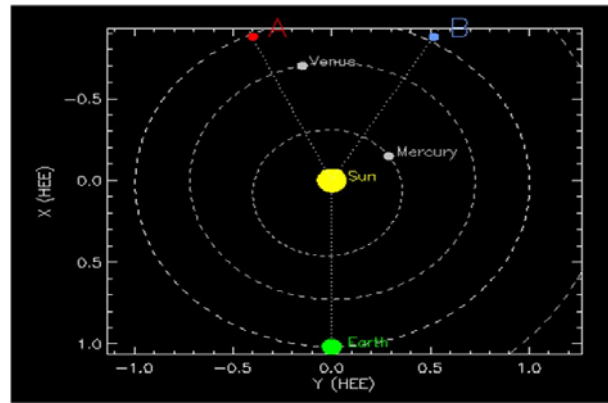


Рис. 1. Местоположение космических аппаратов STEREO-A и STEREO-B на 25 июня 2016 г.

На рис. 3, *a–d* представлена эволюция залимбового эруптивного протуберанца на одной частоте для правой круговой поляризации. Стоит отметить, что картина для левой круговой поляризации значительно не отличается от правой круговой поляризации, поэтому мы не приводим ее в данной работе. Временной диапазон составляет от 01:47 UT до 03:03 UT. Черными кругами обозначена область коронального выброса массы, особенно хорошо видно на рис. 3, *b, c*. Для наглядности мы приводим увеличенный сегмент коронального выброса массы.

Процедура поиска и анализа корональных выбросов массы заключалась в том, чтобы сравнить изображения, полученные по данным SDO/AIA с изображениями СРГ и проследить, как ведут себя корреляционные кривые, получаемые регулярно на пяти частотах. Мы приводим корреляционные кривые за 25 июня 2016 г. (рис. 4), так как в это время наблюдался сильный корональный выброс массы.

SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) — космический аппарат для наблюдения за Солнцем. Совместный проект ЕКА и НАСА. Был запущен 2 декабря 1995 г., выведен в точку Лагранжа L_1 , системы Земля–Солнце и приступил к работе в мае 1996 г. [https://sohowww.nascom.nasa.gov/home.html].

LASCO (Large Angle and Spextrometric Coronagraph) — широкоугольный спектрометрический коронограф. Содержит в себе три коронографа: C1, C2, C3. На этом инструменте наблюдаются корональные выбросы массы [https://sohowww.nascom.nasa.gov/home.html].

На рис. 5 приведено изображение эруптивного протуберанца слева, который был зарегистрирован коронографом LASCO C2 в 04:00 UT. Белым кругом в центре очерчено Солнце.

На рис. 6 показан корональный выброс массы справа в 07:39 UT, полученный с коронографа COR2 [https://stereo.gsfc.nasa.gov]. Белым кругом в центре очерчено Солнце. Черный круг представляет собой диафрагму.

Заключение

Преимущества SRH заключаются в следующем: временное разрешение достаточно высокое для изучения многих процессов на Солнце, многочастотные наблюдения с настраиваемой частотой, зависящей от программы наблюдений, получение изо-

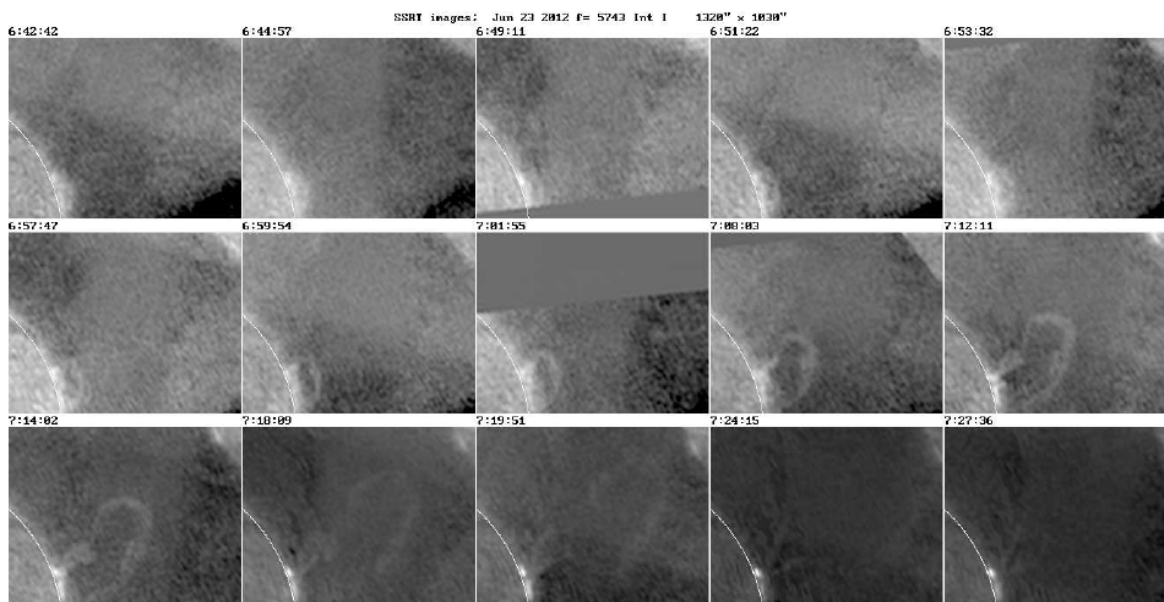


Рис. 2. Последовательность изображений с ССРТ во время эрупции волокна, которое началось около 06:40 UT 23 июня 2012 г. [Alissandrakis et al., 2013]



Рис. 3. Эволюция залимбового эруптивного протуберанца по данным СРГ на частоте 5.2 ГГц, который наблюдался 25 июня 2016 г. (справа), кульминация события (слева)

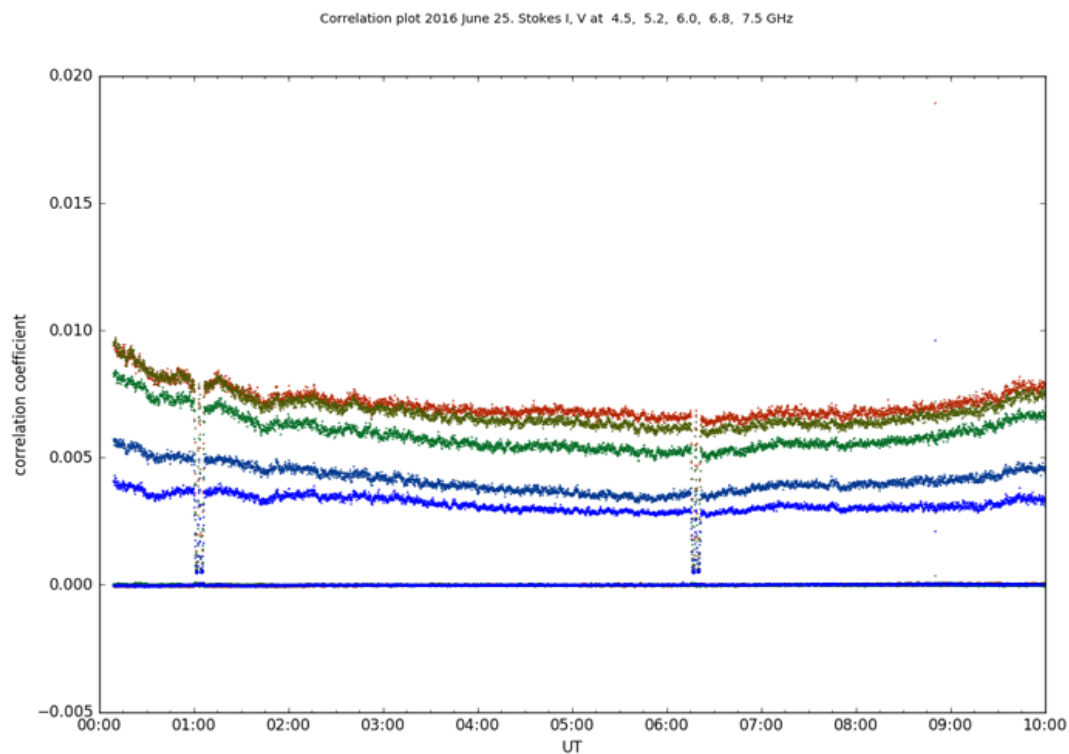


Рис. 4. Корреляционные кривые, на которых измерения проводились с 00:00 UT до 10:00 UT за 25 июня 2016 г.

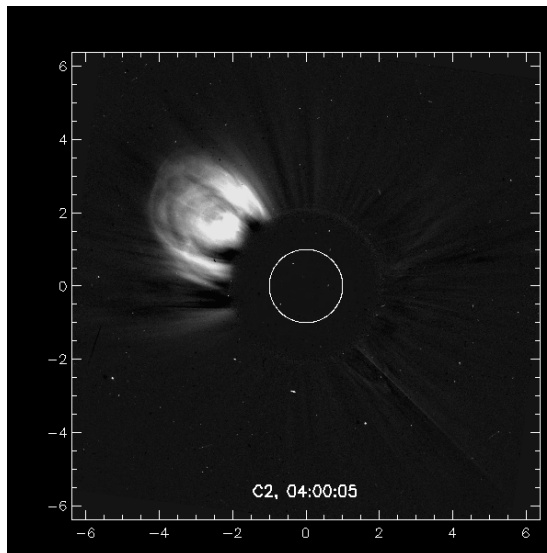


Рис. 5. Корональный выброс массы, зарегистрированный коронографом C2 [<https://sohowww.nascom.nasa.gov/home.html>]

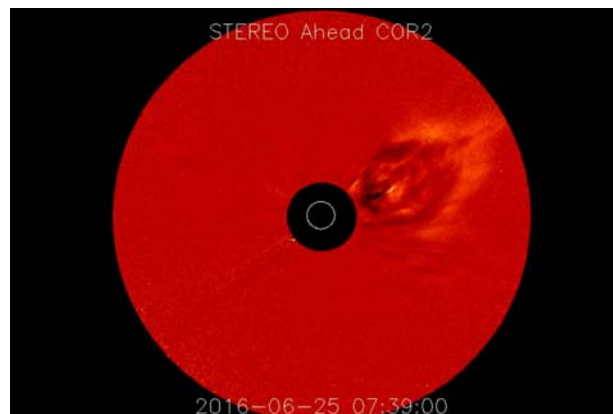


Рис. 6. Корональный выброс массы, зарегистрированный STEREO COR2 [<https://stereo.gsfc.nasa.gov>]

бражений на основе синтеза и оптимизации пространственного разрешения, а также чувствительности, и отсутствие геометрических искажений, позволяет радиогелиографу получать более качественные изображения по сравнению с ССРТ. SRH будет расширен до 96 антенн, что улучшит его пространственное разрешение, что позволит определять корональные выбросы массы и их распространение до высот от одного до двух солнечных радиусов, таким образом заполняя промежутки между наблюдениями в ультрафиолетовом и оптическом диапазонах.

По итогам работы нами была разработана программа построения изображений из исходных данных СРГ. Проведен анализ залимбового эруптивного протуберанца в диапазоне частот 4–8 ГГц, который наблюдался в восточной части солнечного лимба (109° E, 15° N) с 01:47 UT до 03:15 UT ($\sim 1R_\odot$) на пяти частотах (4.5, 5.2, 6.0, 6.8, 7.5 ГГц), вычислена скорость протуберанца, которая составила ~ 400 км/с, проведены сравнения изображений по данным SOHO/LASCO. Стоит отметить, что теперь у нас появилась возможность наблюдать корональные выбросы массы на пяти частотах, что расширило горизонты нашего исследования, позволив более детально исследовать активные процессы на Солнце, в отличие от ранее использовавшегося ССРТ.

Список литературы

- Филиппов Б.П. Эруптивные процессы на Солнце. М.: Физмалит, 2007. 213 с.
- Alissandrakis C.E., Kochanov A.A., Patsourakos S., et al. Microwave and EUV Observations of an erupting filament and associated flare and CME // PAS, 2013. P. 19.
- Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Ivanov E.F., et al. The multifrequency Siberian Radioheliograph // Solar Phys. 2012. V. 280, iss. 2. P. 651–661.
- Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Ivanov E.F., Gubin A.V. A 96-antenna radioheliograph // Res. Astron. Astrophys. 2014. V. 14, iss. 7. P. 864–868.
- STEREO [Electronic resource]: [site]. [2006]. URL: <https://stereo.gsfc.nasa.gov/> (02.05.2017).
- SOHO [Electronic resource]: [site]. [1995]. URL: <https://sohowww.nascom.nasa.gov/home.html> (05.05.2017).
- LASCO [Electronic resource]: [site]. [1995]. URL: <https://sohowww.nascom.nasa.gov/home.html> (07.05.2017).
- badary.iszf.irk.ru/srhCorrPlot.php
- <ftp://badary.iszf.irk.ru/data/srh48/lightcurve>