
НАБЛЮДЕНИЯ ЭРУПТИВНЫХ СОБЫТИЙ С ПОМОЩЬЮ СИБИРСКОГО РАДИОГЕЛИОГРАФА

OBSERVATION OF ERUPTIVE EVENTS WITH THE SIBERIAN RADIOHELIOGRAPH

А.Ю. Федотова

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, fedotovanastya@iszf.irk.ru*

А.Т. Алтынтцев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, altyntsev@iszf.irk.ru*

А.А. Кочанов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, kochanov@iszf.irk.ru*

С.В. Лесовой

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, lesovoi@iszf.irk.ru*

Н.С. Мешалкина

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, nata@iszf.irk.ru*

A.Yu. Fedotova

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, fedotovanastya@iszf.irk.ru*

A.T. Altyntsev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, altyntsev@iszf.irk.ru*

A.A. Kochanov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, kochanov@iszf.irk.ru*

S.V. Lesovoi

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, lesovoi@iszf.irk.ru*

N.S. Meshalkina

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, nata@iszf.irk.ru*

Аннотация. Описаны методы регистрации эруптивных событий с помощью первой очереди Сибирского солнечного радиогелиографа (СРГ-48). Приведены примеры зарегистрированных событий: 1) подъем протуберанца над лимбом, наблюдавшийся на последовательностях радиоизображений 24 апреля 2017 г.; 2) джет, зарегистрированный 2 августа 2017 г., холодное вещество которого экранировало излучение компактного микроволнового источника в течение нескольких десятков минут. Затенение джета проявилось на корреляционных кривых СРГ-48 в виде так называемого отрицательного всплеска. На примере такого всплеска на корреляционных кривых 9 февраля 2017 г. показано, что интервалы с депрессией микроволнового излучения локальных источников не всегда вызываются затенением их излучения. В данном событии радиояркость в течение десяти часов уменьшалась относительно повышенного квазистационарного излучения активной области АО 12635 во время развития ее магнитной структуры. Подобное поведение излучения активной области наблюдалось также в EUV, SXR и радиозлучении на 17 ГГц.

Ключевые слова: радиогелиограф, Солнце, эруптивные события, джет.

Abstract. We describe methods for monitoring eruption activity with the first phase of the multiwave Siberian Radioheliograph (SRH-48). We give examples of the recorded eruptive events: 1) rise of a prominence above the limb observed in the radio map sequence of April 24, 2017; 2) a jet recorded on August 2, 2017, whose cold matter screened a compact microwave source for several tens of minutes. The shading due to the jet appearance was observed on SRH-48 correlation curves as the so-called “negative” burst. Using the “negative” burst on the correlation curves of February 9, 2017 as an example, we show that the intervals with depression of the microwave emission of local sources are not always caused by shading of their emission. In this event, the radio brightness decreased within ten hour period of the increased quasi-stationary emission during the development of AR 12635 magnetic structure. Similar behavior was observed in EUV, SXR, and radio emission at 17 GHz.

Keywords: radioheliograph, Sun, eruptive events, jet.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее энергичными проявлениями солнечной активности являются эруптивные события. Они включают в себя динамические явления, такие как вспышки, джеты, эрупции протуберанцев и корональные выбросы массы (КВМ). Сложность исследования эруптивных явлений заключается в том, что на данный момент непрерывные наблюдения процесса эрупции от зарождения в нижних слоях атмосферы до перехода в возмущенное состояние межпланетной среды редко удается реализовать.

Отличительной чертой радионаблюдений является возможность мониторинга КВМ на стадии их формирования в нижней короне и регистрации до расстояний в несколько радиусов Солнца. В микроволновом диапазоне для наблюдения КВМ в солнечной атмосфере с пространственным разрешением используются радиогелиограф Нобеяма (NoRH) на частотах 17 и 34 ГГц [Nakajima et al., 1994] и Сибирский солнечный радиотелескоп (ССРТ) на частоте 5.7 ГГц, [Grechnev, 2003].

Связанные с эрупцией события отличаются большим разнообразием динамики развития, массы и скорости движения вещества. Наиболее мощными эруптивными событиями являются КВМ, в которых масса выбрасываемого вещества может достигать 10^9 т, а скорость — 2000 км/с. КВМ наблюдается в виде растущей гигантской петли, одно или оба основания которой закреплены в солнечной атмосфере. Магнитное поле в выбросе, как правило, выше, чем в спокойном солнечном ветре, и представляет собой скрученные в жгут магнитные силовые линии. Наиболее известны наблюдения КВМ в картинной плоскости с помощью коронографов SOHO/LASCO [Brueckner et al., 1995; <https://sohowww.nascom.nasa.gov>]. В настоящее время удастся определить направление движения КВМ с помощью пары космических аппаратов проекта STEREO [Kaiser et al., 2007; <https://stereo.gsfc.nasa.gov>], которые разведены на большие углы по орбите Земли. Если КВМ направлен в сторону Земли, он достигает ее за время от одного до трех дней, приводя к возмущению плазмы околоземного пространства, что является важным фактором космической погоды.

Появление КВМ часто связано с эрупцией волокон. Анализируя последовательности изображений NoRH на 17 ГГц, авторы [Gopalswamy et al., 2003] установили на большом статистическом материале, что 82 % эрупций волокон сопровождались КВМ. В волокнах содержится холодная плазма с яркостной температурой около 8000 К, следовательно, КВМ является оптически толстым в микроволнах. В излучении волокна доминирует тепловое тормозное излучение, поэтому его видно как темную структуру на фоне диска, яркостная температура которого составляет 10 000 К на 17 ГГц. Выше лимба волокно ярко выделяется на фоне неба [Kundu et al., 2004]. На изображениях ССРТ контраст яркостных температур волокна и спокойного диска Солнца больше, чем на изображениях радиогелиографа NoRH. Это связано с тем, что яркостная температура спокойного Солнца на 5.7 ГГц выше и равна 16 000 К. Первые наблюдения эруптирующих волокон на ССРТ опубликованы в работе [Uralov et al., 2002; Alissandrakis et al., 2013].

Наряду с крупномасштабными эрупциями волокон наблюдения в крайнем ультрафиолетовом диапазоне обнаруживают часто происходящие мелкомасштабные выбросы плазмы в солнечную корону — так называемые джеты. Они представляют собой быстро поднимающиеся коллимированные струи плазмы вдоль силовых линий магнитного поля, наблюдаемые в крайнем ультрафиолетовом и жестком рентгеновском излучении [Shimojo et al., 1996; Canfield et al., 1996]. Их длина может варьировать от характерных для макроспикул размеров небольших струй до сотен тысяч километров в случае рентгеновских джетов [Raouafi et al., 2016], а время жизни может изменяться от нескольких минут до нескольких часов. Наблюдения джетов в микроволновом излучении крайне редки из-за малых размеров и относительно низких яркостных температур. Известны

работы [Kundu et al., 1999; Nakajima, Yokoyama, 2002] с описанием наблюдений событий, связанных с джетом на 17 ГГц. Было показано, что плазма джета может быть нагрета до яркостной температуры 28 МК, а также может присутствовать нетепловая компонента электронов. Исследования природы джетов важны для понимания процессов нагрева короны и формирования солнечного ветра, т. е. связаны с широким кругом задач гелиофизики.

В микроволновом излучении выбросы вещества, включая небольшие джеты, могут быть обнаружены также по затенению локального микроволнового источника облаком холодного поглощающего вещества. На световых кривых микроволнового излучения затенения проявляются как депрессии излучения, так называемые отрицательные всплески, с длительностью от нескольких минут до десятков минут. Первое событие с отрицательным всплеском описано в работе [Covington, 1969] как послевсплесковое уменьшение радиопотока на частоте 2.8 ГГц после импульсного радиовсплеска 19 мая 1951 г. В последние годы исследованию диагностического потенциала наблюдений отрицательных всплесков был посвящен ряд работ, использующих наблюдения на радиогелиографах [Maksimov, Nefedyev, 1991; Grechnev et al., 2013, 2014; Uralov et al., 2014].

В 2016 г. в Радиоастрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН начаты наблюдения на многоволновом Сибирском радиогелиографе (СРГ) в диапазоне частот 4–8 ГГц [Лесовой, Кобец, 2017]. Первые наблюдения показали, что корреляционные кривые дают возможность уверенной регистрации событий с залимбовыми эрупциями и отрицательными всплесками [Лесовой, Кобец, 2017; Grechnev et al., 2018]. Основная цель данной статьи заключается в продолжении работы по оценке возможностей СРГ для наблюдений эруптивных явлений. Рассматриваются два метода наблюдений выбросов плазмы. Первый заключается в том, чтобы по построенным изображениям проследить движение эруптивных волокон и струй над солнечным лимбом. Второй метод основан на том, чтобы по изображениям диска Солнца, полученным СРГ, исследовать динамику источника, затенение которого приводит к отрицательному всплеску интегрального микроволнового излучения.

НАБЛЮДЕНИЯ

Инструменты

Сибирский радиогелиограф создан с использованием поворотных устройств и инфраструктуры Сибирского солнечного радиотелескопа (ССРТ) [Лесовой, Кобец, 2017]. Цель модернизации: 1) реализация апертурного синтеза изображений, позволяющая на порядки улучшить временное разрешение, 2) переход к многоволновым измерениям в диапазоне частот 4–8 ГГц. Основные характеристики первой очереди радиогелиографа с 48 антеннами и максимальной базой 152 м: частота приема меняется со-

гласно протоколу циклично в диапазоне рабочих частот 4–8 ГГц; пространственное разрешение в зависимости от частоты находится в диапазоне 0.8'–1.6'; спектральное разрешение частотного канала 10 МГц; чувствительность по потоку около 100 Ян. Регистрируются потоки в обеих круговых поляризациях (RCP, LCP).

В представленной работе наблюдения проводились на частотах 4.2, 4.5, 5.2, 6.0 и 6.8 ГГц. Отбор событий для анализа выполнялся с помощью корреляционных кривых, доступных на сайте [<http://badary.iszf.irk.ru>]. Корреляционные кривые строятся суммированием комплексных корреляций, вычисляемых для различных пар антенн, и позволяют проследить изменение потока принимаемого радиоизлучения. Подробное описание их вычисления дано в статье [Лесовой и др., 2017].

Для анализа событий использовались последовательности микроволновых изображений радиогелиографа Нобеяма на 17 ГГц [<http://solar.nro.nao.ac.jp>], изображений в крайнем ультрафиолетовом излучении, полученных на космическом аппарате Solar TERrestrial RELations Observatory (STEREO) [<https://stereo.gsfc.nasa.gov>; Kaiser et al., 2007] и Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS) [<http://www.lmsal.com/solarsoft/irisa>; Culhane et al., 2007; Pontieu et al., 2014].

Эруптивное волокно 24.04.2017

Начало наблюдений на СРГ пришлось на минимум солнечной активности, когда события, связанные с надлимбовыми проявлениями эрупций происходили редко. Одним из немногих зарегистрированных ярких событий был KBM 24 апреля 2017 г., фронтальная структура которого появилась на изображениях LASCO/C2 в 02:48 UT. На СРГ удалось зарегистрировать над лимбом (рис. 1 *a–c*) подъем волокна, эрупция которого отчетливо наблюдалась на орбитальной обсерватории SDO/AIA на длинах волн 171, 304 и 131 Å (рис. 1, *b–e*).

На рис. 1 представлена последовательность изображений эволюции эруптивного волокна с 02:00 до 04:00 UT по данным СРГ на частотах 6.0 (*a*), 5.2 (*b*), 4.5 ГГц (*c*); SDO на длине волны 304 Å (*d*) и NoRH на частоте 17 ГГц (*e*). В момент начала наблюдений вершина волокна с координатами E40, N40 находилась на диске [<https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/DONKI/search>].

Видно хорошее согласие в положении и высотах поднимающегося волокна на изображениях в разных диапазонах излучения. Вершина волокна появилась над лимбом около 02:00 UT, к 04:00 UT оно поднялось над лимбом выше 150 Мм. На изображениях СРГ структура волокна замыта из-за недостаточного пространственного разрешения, которое пропорционально частоте наблюдения. Видно, что на частоте 6.0 ГГц изображения наиболее четкие. На панелях *a*, *b* (5.2 и 6.0 ГГц) и *d* (304 Å) видна часть волокна на фоне диска, которая не наблюдалась на изображениях на 17 ГГц. Это связано с тем, что оптическая толщина волокна в диапазоне СРГ на порядок выше, чем на частоте 17 ГГц. Потемнение

волокна на фоне диска Солнца указывает, что его яркостная температура ниже эффективной температуры спокойного Солнца (16 000 К) на частоте 6.0 ГГц [Zirin et al., 1991; Borovik, 1994]. На меньших частотах волокно видно на фоне диска хуже, поскольку относительная разница эффективных температур волокна и диска Солнца снижается. В целом, чувствительность приемных систем СРГ позволяет регистрировать прирост интегрального излучения Солнца, связанный с появлением залимбовых источников. После введения в эксплуатацию второй очереди СРГ с антеннами, расположенными на крайних антенных постах, пространственное разрешение повысится в несколько раз и будет достаточным для изучения структурных особенностей эруптивных выбросов, распределения плотности и яркостной температуры плазмы в эруптирующих волокнах.

На корреляционных зависимостях отклик на появление эруптивного волокна мал. На верхней панели (рис. 2) показана разность корреляционных кривых 24 и 25 апреля 2017 г., измеренных в соседние дни активного и спокойного Солнца соответственно. Она позволяет выделить вклад активных процессов и уменьшить влияние дневного хода кривых, связанного с изменением баз интерферометра при вращении Земли относительно Солнца. На нижней панели показан поток микроволнового излучения на 17 ГГц из волокна над лимбом Солнца, полученный из последовательностей изображений NoRH путем вычитания потока диска Солнца.

Корреляционные кривые СРГ показывают усиление микроволнового излучения между 01:00 и 02:00 UT, которое является откликом на вспышку класса B2.4 в активной области 2653 (S11E51), расположенной далеко от области эрупции волокна. С появлением волокна над лимбом можно связать замедление спада на кривых для высоких частот с 02:00 до 04:00 UT.

Джет 2 августа 2017 г.

Второй метод обнаружения эруптивных выбросов рассмотрим на примере события 2 августа 2017 г. На корреляционных кривых СРГ можно выделить в течение светового дня несколько интервалов (рис. 3) с депрессией яркости (отрицательными всплесками). События слабые, и на световых кривых крайнего ультрафиолетового излучения SDO/AIA отклики не наблюдались. Данные IRIS по ультрафиолетовому излучению были доступны для восходящей активной области 12670 в течение 04:49–06:18 UT. Было обнаружено, что депрессия микроволнового излучения с 05:00 до 05:30 UT наблюдалась во время джета, зафиксированного в диапазоне FUV 1332–1406 Å (рис. 4). Область джета обозначена голубой окружностью. На последовательностях изображений IRIS SJI виден быстрорастущий яркий джет, поднимающийся над активной областью. На рис. 3 соответствующий интервал времени с депрессией выделен вертикальными линиями. Глубина депрессии на всех частотах СРГ была примерно одинакова и соответствовала уменьшению радиояркости Солнца на несколько с.е.п.

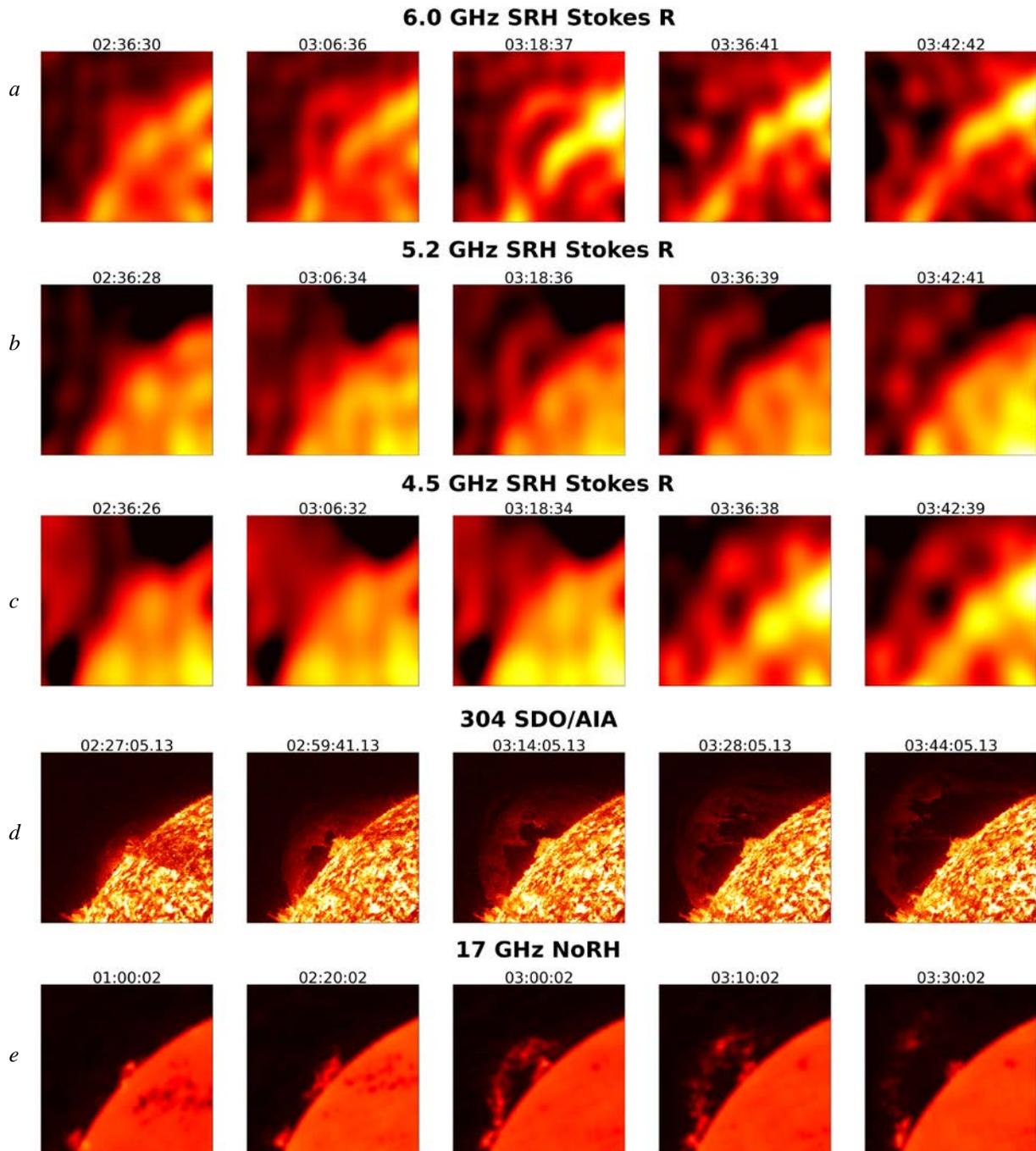


Рис. 1. Последовательность изображений СРГ на частотах 6,0, 5,2 и 4,5 ГГц (*a–c*), SDO на длине волны 304 Å (*d*) и NoRH на частоте 17 ГГц (*e*) во время появления эруптивного волокна над лимбом 24 апреля 2017 г. Размер кадров 600"×600"

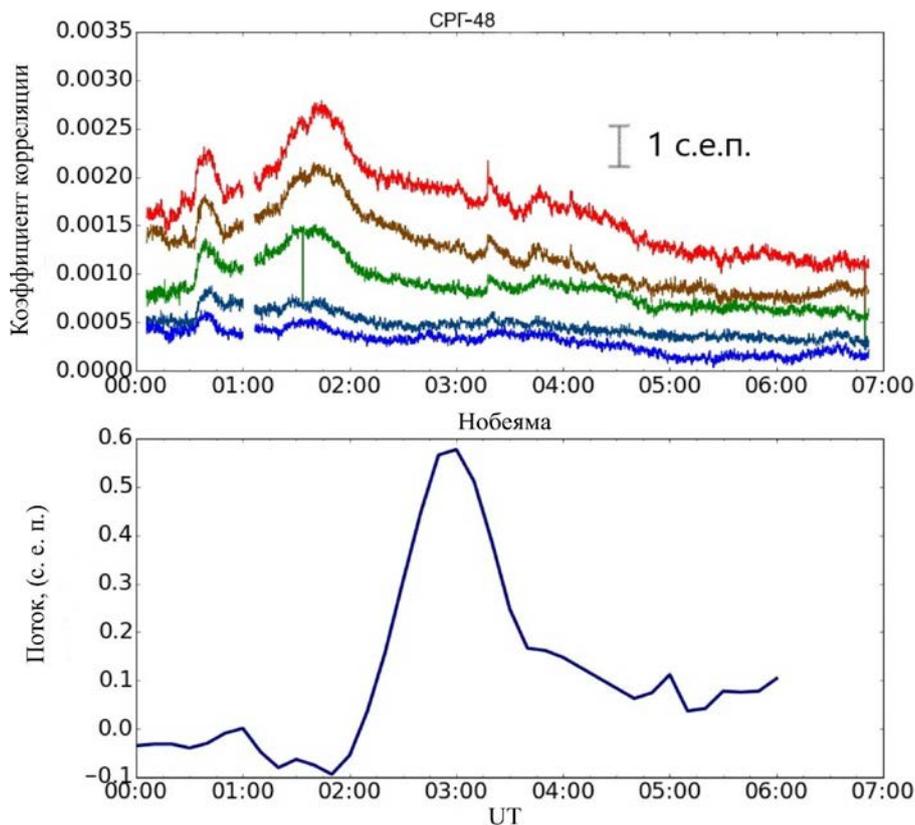


Рис. 2. Вверху: разность корреляционных кривых 24 и 25 апреля, измеренных на СРГ в интенсивности R+L с 00:00 до 07:00 UT. Кривые соответствуют частотам 4.2, 4.5, 5.2, 6.0 и 6.8 ГГц (сверху вниз). Внизу: изменение залимбового потока микроволнового излучения на частоте 17 ГГц. Длина вертикального отрезка соответствует 1 с.е.п.

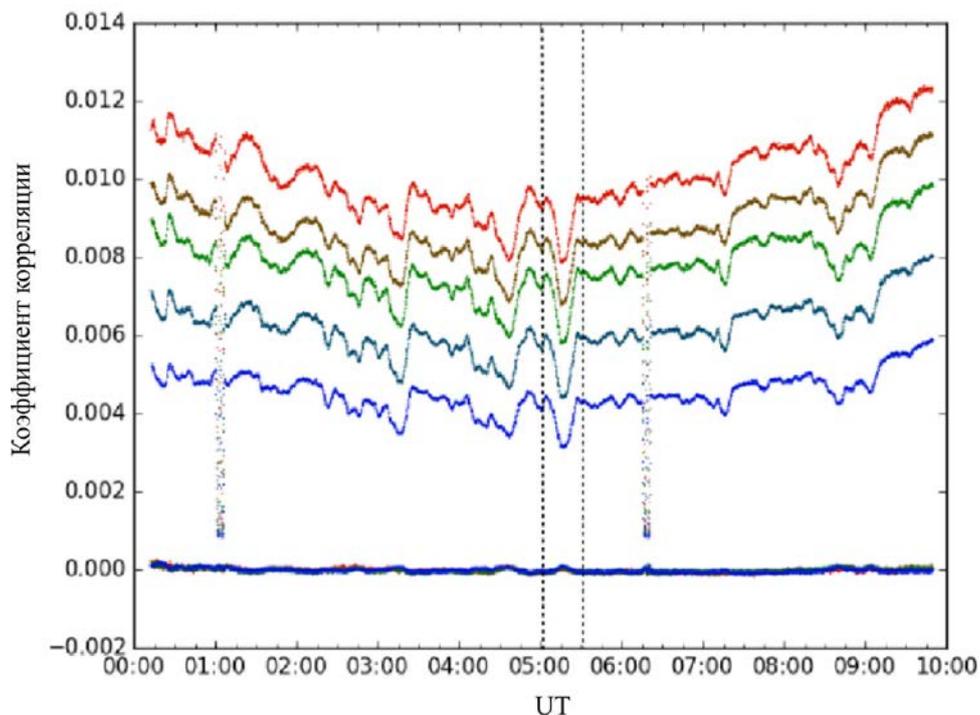


Рис. 3. Корреляционные кривые 2 августа 2017 г. Верхние корреляционные кривые соответствуют интенсивности на частотах 4.2, 4.5, 5.2, 6.0 и 6.8 ГГц (сверху вниз); нижние со значениями около нуля — круговой поляризации. Интервал с депрессией 05:00 до 05:30 UT, во время которого на IRIS SJI наблюдался джет, выделен вертикальными пунктирными линиями

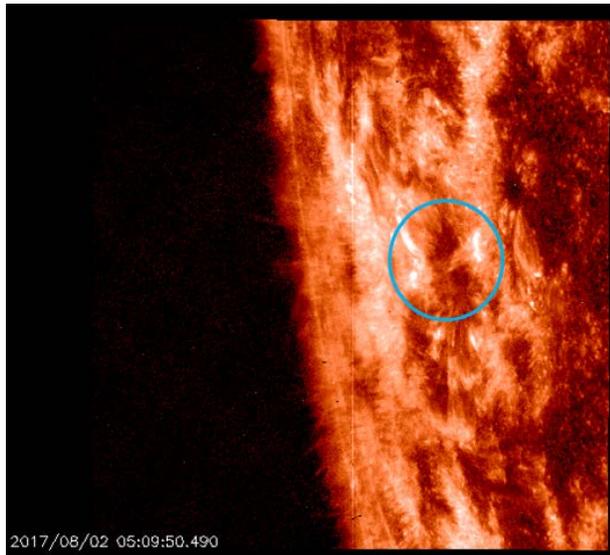


Рис. 4. Изображение джета 2 августа 2017 г., 05:09 UT по данным IRIS SJI в полосе FUV (1330 Å). Размер кадра 400"×400"

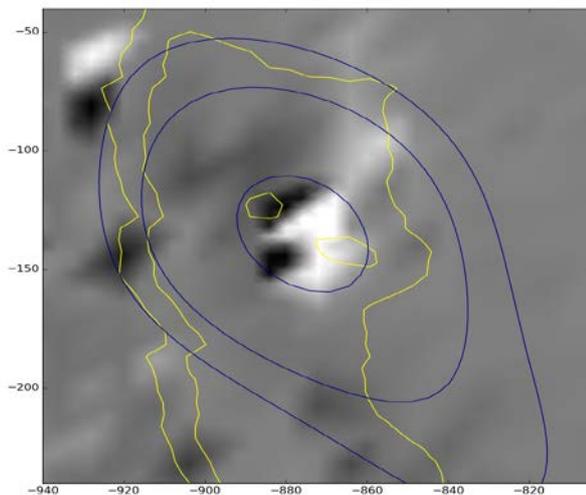


Рис. 5. Магнитограмма с нанесенными на нее контурами источника по данным СРГ на частоте 6.0 ГГц (синие контуры), NoRH на частоте 17 ГГц (желтые контуры) в 05:20 UT. Уровни контуров — 0.3, 0.5 и 0.9 от максимумов карт интенсивности

На рис. 5 показана магнитограмма области, в которой наблюдался джет. На магнитограмму нанесены контурами распределения яркости микроволнового излучения на 6.0 и 17 ГГц. Разрешение радиогелиографа Нобеяма составляет 10" и позволяет разрешить два центра яркости, соответствующие N и S поляриностям магнитного поля. В целом, область излучения на уровне 0.5 охватывает всю активную область. Разрешение СРГ значительно хуже 80", и структура источника не разрешается. Источник на частоте 6.0 ГГц, как и на 17 ГГц, вытянут с севера на юг и его видимые размеры на уровне 0.5 составляли 80"×150". Карты СРГ в круговой поляризации показывают, что микроволновый источник поляризован по левому кругу. Таким образом, интервал с частичным затенением источника проявляется на интегральных корреляционных кривых как прирост пра-

вополяризованного излучения. Согласно изображениям IRIS SJI, плазма джета распространялась в картинной плоскости на восток, т. е. затеняла область с фотосферным магнитным полем, направленным от наблюдателя. В этом случае затенение должно приводить к уменьшению излучения обыкновенной моды, что согласуется с появлением на корреляционных кривых выброса со знаком обыкновенной волны.

Депрессия яркости 09.02.2017

Регистрация КВМ как отрицательного всплеска на корреляционных кривых возможна либо при затенении яркого локального источника, либо при достаточно большой площади затенения поверхности спокойного Солнца. Однако в некоторых случаях отрицательные всплески являются откликом не на затенение, а на резкое уменьшение квазистационарного излучения развивающейся активной области. В некоторых случаях длительные активные процессы в активных областях могут проявляться в повышении квазистационарного уровня микроволнового излучения в течение нескольких часов, а затем в резком уменьшении. Ярким примером являются события 08.02.2017 и 09.02.2017 (рис. 6). Показана разность корреляционных кривых, полученных при вычитании из кривых 9 февраля значений спокойного дня 8 февраля, когда не наблюдались значимые вариации корреляций. Видно ярко выраженное синхронное уменьшение радиопотока на всех частотах в интервале 04:30–05:45 UT, который выделен на корреляционных кривых в интенсивности вертикальными линиями. Относительная глубина депрессии корреляционных кривых примерно одинакова на всех частотах и достигает 1.5 %, что соответствует уменьшению потока Солнца на несколько с.е.п. На корреляционных кривых поляризации отклика на отрицательный всплеск в интенсивности не видно. Следует отметить, что в световых кривых интегрального потока спектрополяриметра 2–24 ГГц отклик на отрицательный всплеск не наблюдался, что подтверждает небольшой уровень глубины депрессии.

Радиокарты полного диска Солнца, полученные с помощью СРГ-48, позволили определить область на Солнце, уменьшение яркости которой приводит к наблюдаемой депрессии на корреляционных кривых. Ниже на рис. 7, а, б представлены последовательности радиокарт на частоте 6.8 ГГц для RCP и LCP в верхнем и нижнем ряду соответственно. На диске виден один яркий неполяризованный источник с координатами (320", -400"). Интенсивность излучения источника значительно уменьшена на картах второго столбца, соответствующего времени минимума корреляционной кривой. Микроволновый источник соответствовал быстро развивающейся активной области NOAA 12635.

Чтобы разобраться в причинах уменьшения яркости микроволнового источника, рассмотрим динамику излучения в других диапазонах. На рис. 8 показаны световые кривые излучения Солнца с 00:00 до 13:00 UT 9 февраля в период формирования актив-

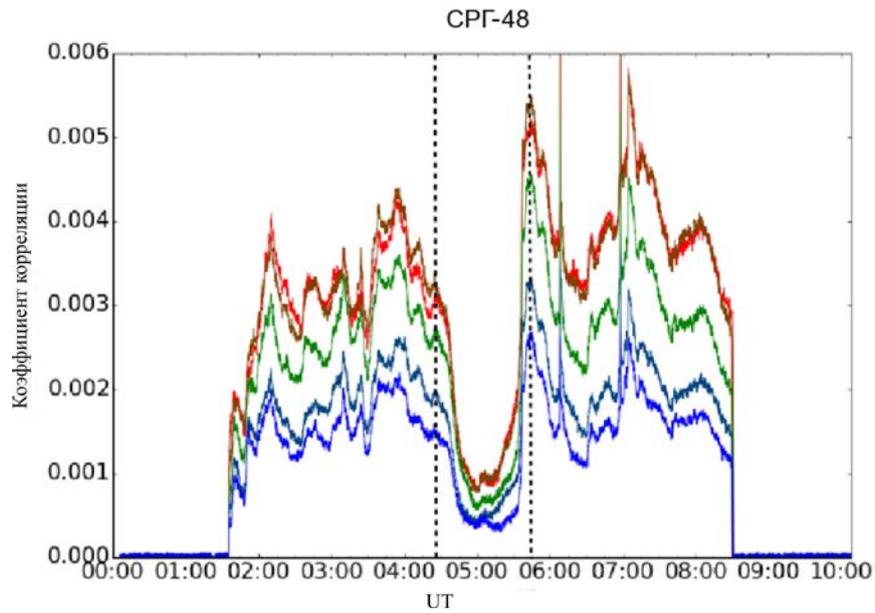


Рис. 6. Разность между корреляционными кривыми 8, 9 февраля 2017 г. с депрессией с 04:30 до 05:45 UT. Кривые соответствуют частотам 4.2, 4.5, 5.2, 6.0 и 6.8 ГГц (сверху вниз)

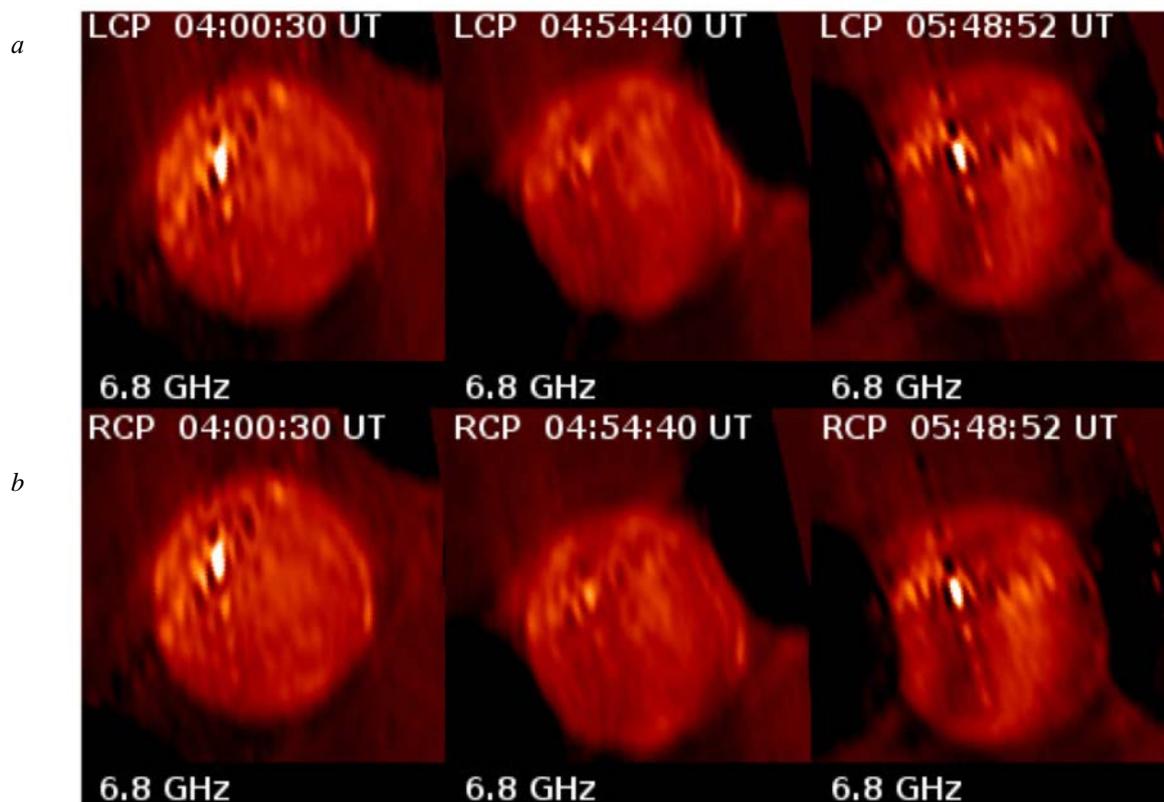


Рис. 7. Последовательности радиокарт СРГ на частоте 6.8 ГГц во время депрессии на корреляционных кривых в левой (LCP) и правой (RCP) круговой поляризации (a, b соответственно)

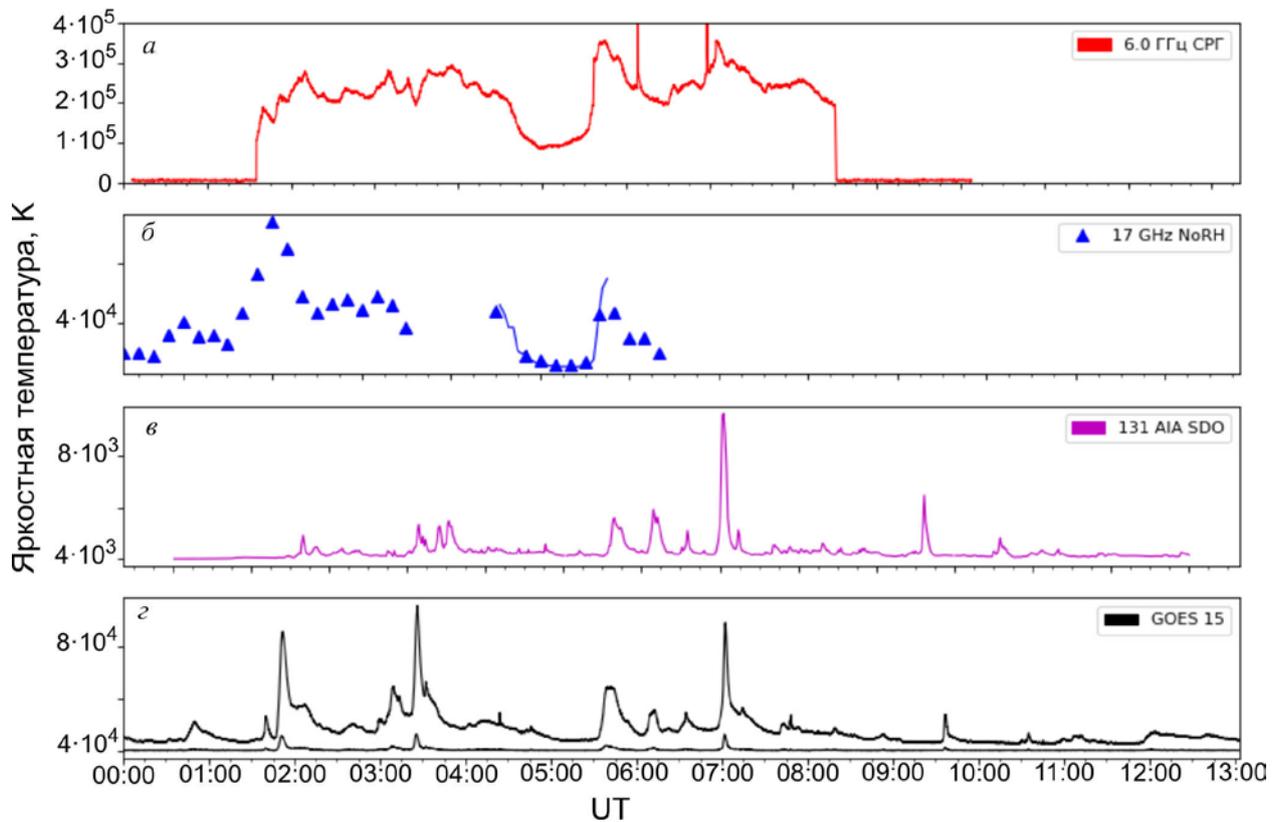


Рис. 8. Изменения активности Солнца 9 февраля с 00:00 до 07:00 UT по данным СРГ — максимум яркостной температуры на частоте 6.0 ГГц, NoRH на частоте 17 ГГц — максимум яркостной температуры, величина сигнала SDO на длине волны 131 Å, потоки GOES 15 в двух каналах мягкого рентгеновского излучения

ной области NOAA 12634. На верхней панели приведена зависимость яркостной температуры в максимуме источника на частоте 6.0 ГГц. Калибровка радиогелиографа выполнена в предположении, что яркостная температура диска Солнца на 6.0 ГГц считается равной 16 000 К [Воровик, 1994]. Видно, что во время депрессии яркостная температура падает от 300 000 до 90 000 К. Отметим, что из-за недостаточного пространственного разрешения эти оценки могут быть значительно занижены.

На рис. 8, б приведена аналогичная зависимость на частоте 17 ГГц. Треугольниками показаны значения, полученные по радиокартам полного диска со скважностью 10 мин, а сплошной линией — по кадрам со скважностью 1 с. Если бы такой значительный уровень депрессии на 17 ГГц вызывался затеняющим веществом над источником, то на 6 ГГц источник затенялся бы полностью, а не просвечивал, как это видно на рис. 7, а, б. Радиокарты на 17 ГГц показывают также один источник с видимыми размерами порядка диаграммы направленности, т. е. 10".

Непрерывные наблюдения развивающейся области возможны с помощью космических аппаратов GOES и SDO. Интенсивность излучения в крайнем ультрафиолетовом излучении в линии высокоионизованного железа 131 Å после 20:00 UT плавно увеличивается до 07:00 UT, а потом происходит спад до 13:30 UT 9 февраля. Поведение потока мягкого рентгеновского излучения аналогично. В обоих диа-

пазонах излучения период депрессии микроволнового излучения соответствует низким уровням излучения в крайнем ультрафиолетовом и мягком рентгеновском излучениях.

На изображениях активной области в крайнем ультрафиолетовом излучении SDO/AIA не удалось обнаружить потоки плазмы, затеняющей NOAA 12634. Таким образом, можно уверенно утверждать, что данный отрицательный всплеск не связан с эрупцией холодной плазмы, а является откликом на динамику активных процессов энерговыделения в активной области.

ОБСУЖДЕНИЕ

Наблюдения эруптивных событий на СРГ с 48 антеннами и максимальной базой 154 м демонстрируют, что радиогелиограф имеет достаточно высокую чувствительность для регистрации эруптивных событий, включая слабые джеты на диске Солнца. Традиционный метод заключается в наблюдении микроволновых источников, появляющихся над лимбом.

Примером использования результатов наблюдений с помощью микроволнового коронографа является каталог лимбовых событий на 17 ГГц [<http://solar.nro.nao.ac.jp/norh/html/prominence>], который ведется на сайте радиогелиографа Нобеяма с 1992 г. Анализ наблюдений сотен протуберанцев на частоте 17 ГГц во время 23-го цикла показал, что частота их появления подобна изменению количе-

ства пятен, хотя времена наступления максимумов не совпадают. Частота появления протуберанцев зависит от широты, а область их появления мигрирует с фазой цикла [Shimojo et al., 1996]. Связь вспышечной активности и эрупций плазмы представлена в каталоге [<https://hinode.isee.nagoya-u.ac.jp/ICCON>]. Аналогичный мониторинг на частотах 4–8 ГГц планируется организовать по данным СРГ. Сложностью настоящих наблюдений на СРГ является недостаточное пространственное разрешение, которое будет увеличено в несколько раз в течение одного-двух лет с введением в эксплуатацию удаленных антенн. Опыт наблюдений на ССРТ на частоте 5.7 ГГц показал, что разрешение порядка 10''–15'' позволит определять кинематические характеристики структур КВМ до нескольких солнечных радиусов, что заполнит пробел между наблюдениями в крайнем ультрафиолетовом излучении SDO/AIA и в рассеянном свете LASCO/C2 [Uralov et al., 2002; Alissandrakis et al., 2013].

Сравнение изображений эруптирующих волокон на разных частотах позволит проверить независимым методом измерения яркостной температуры по данным в ультрафиолетовом излучении и дополнить диапазон ее измерений до более низких значений.

Исследование джетов и связанных с ними явлений важно для прогноза космической погоды, поскольку джеты являются одними из наиболее частых проявлений солнечной активности и связаны с процессами нагрева короны и формирования солнечного ветра. Из наблюдений следует, что мониторинг отрицательных всплесков важен для диагностики параметров джетов, появляющихся на диске Солнца. Методы анализа разработаны на примере случаев с глубокими депрессиями микроволнового излучения, проявляющимися в наблюдениях интегрального потока Солнца. В работе [Kuzmenko et al., 2009] было продемонстрировано, что по значениям радиопоглощения, измеренным в интегральном микроволновом излучении на нескольких частотах, можно получить оценки параметров поглощающей плазмы, таких как яркостная температура, оптическая толщина, площадь затеняющего экрана и его высота над хромосферой. Однако однозначное определение причин отрицательных всплесков, как показал анализ события 9 февраля 2017 г., требует привлечения пространственно-разрешенных наблюдений в других диапазонах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тестовые наблюдения первой очереди СРГ показывают перспективность нового инструмента исследования эруптивных событий как для решения фундаментальных задач, так и для мониторинга активности Солнца в прикладных целях. Потенциал многоволновых микроволновых наблюдений будет реализован при увеличении в несколько раз пространственного разрешения СРГ, адаптации к данным инструмента методов чистки первичных изображений от боковых лепестков интерферометра. Опыт работы с многоволновым радиогелиографом, созданным на базе ССРТ, для диапазона частот 4–8 ГГц был

использован при проектировании нового инструмента на диапазон частот 3–24 ГГц, начало строительства которого запланировано в 2018 г.

Авторы выражают благодарность В.Ф. Мельникову за помощь при работе с данными Радиогелиографа Нобейма (NoRH). Мешалкина Н.С. благодарит Collaborating Research Programme KLSA201702.

Работа выполнена за счет средств российского научного фонда (проект № 18-12-00172). Экспериментальные данные получены с использованием уникальной научной установки ССРТ [<http://ckp.rf.ru/usu/73606>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Лесовой С.В., Кобец В.С. Корреляционные кривые Сибирского радиогелиографа // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 1. С. 17–21. DOI: [10.12737/23588](https://doi.org/10.12737/23588).

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. DOI: [10.12737/24347](https://doi.org/10.12737/24347).

Alissandrakis C.E., Kochanov A.A., Patsourkos S., et al. Microwave and EUV observations of an erupting filament and associated flare and coronal mass ejections. Publ. Astron. Soc. Japan. 2013. V. 65, N SP1, article id. S8. 10 p. DOI: [10.1093/pasj/65.sp1.S8](https://doi.org/10.1093/pasj/65.sp1.S8).

Borovik V.N. Quiet Sun from multifrequency radio observations on RATAN-600 // Solar Phys. 1994. V. 432. P. 185–190. DOI: [10.1007/3-540-58041-7_217](https://doi.org/10.1007/3-540-58041-7_217).

Brueckner G.E., Howard R.A., Koomen M.J., et al. The Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO) // Solar Phys. 1995. V. 162, iss. 1–2. P. 357–402. DOI: [10.1007/BF00733434](https://doi.org/10.1007/BF00733434).

Canfield R.C., Reardon K.P., Leka K.D., et al. H-alpha surges and X-ray jets in AR 7260 // Astrophys. J. 1996. V. 464. P. 1016. DOI: [10.1086/177389](https://doi.org/10.1086/177389).

Covington A.E. Solar radio emission at 10.7 cm // Royal Astron. Soc. of Canada. 1969. V. 63. 125 p.

Culhane J.L., Harra L.K., James A.M., et al. The EUV Imaging Spectrometer for Hinode // Solar Phys. 2007. V. 243, iss. 1. P. 19–61. DOI: [10.1007/s10107-007-0293-1](https://doi.org/10.1007/s10107-007-0293-1).

Gopalswamy N., Lara A., Yashiro S., et al. Coronal Mass Ejections and Solar Polarity Reversal // Astrophys. J. Lett. 2003. V. 598, N 1, P. L63–L66. DOI: [10.1086/380430](https://doi.org/10.1086/380430).

Grechnev V.V. A method to analyze imaging radio data on solar flares // Solar Phys. 2003. V. 213, iss. 1. P. 103–110. DOI: [10.1023/A:1023213403562](https://doi.org/10.1023/A:1023213403562).

Grechnev V.V., Meshalkina N.S., Chertok I.M., et al. Relations between Microwave Bursts and near-Earth High-Energy Proton Enhancements and their Origin // Astronomical Society of Japan. 2013. V. 65, iss. sp. 1. DOI: [10.1007/s11207-015-0797-6](https://doi.org/10.1007/s11207-015-0797-6).

Grechnev V.V., Uralov A.M., Chertok I.M., et al. A challenging solar eruptive event of 18 November 2003 and the causes of the 20 November geomagnetic superstorm. II. CMEs, shock waves, and drifting radio bursts // Solar Phys. 2014. V. 289, iss. 4. P. 1279–1312. DOI: [10.1007/s11207-013-0397-2](https://doi.org/10.1007/s11207-013-0397-2).

Grechnev V.V., Lesovoi S.V., Kochanov A.A., et al. Multi-instrument view on solar eruptive events observed with the Siberian Radioheliograph: From detection of small jets up to development of a shock wave and CME // J. Atmosph. Solar-Terr. Phys. 2018. V. 174. P. 46–65. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.04.014](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.04.014).

Kaiser M.L., Kucera T.A., Davila J.M., et al. The STEREO mission: An introduction // Space Sci. Rev. 2007. V. 136, iss. 1–4. P. 516.

Kundu M.R., Nindos A., Raulin J.-P., et al. A microwave study of coronal ejecta // Astrophys. J. 1999. V. 520, iss. 1. P. 391–298. DOI: [10.1086/307454](https://doi.org/10.1086/307454).

Kundu M.R., White S.M., Garaimov V.I., et al. Radio observations of rapid acceleration in a slow filament eruption / fast coronal mass ejection event // *Astrophys. J.* 2004. V. 607, N 1. P. 530–539. DOI: [10.1007/s11214-007-9277-0](https://doi.org/10.1007/s11214-007-9277-0).

Kuzmenko I.V., Grechnev V.V., Uralov A.M. A study of eruptive solar events with negative radio bursts // *Astron. Rep.* 2009. V. 53, iss. 11. P. 1039–1049. DOI: [10.1134/S1063772909110092](https://doi.org/10.1134/S1063772909110092).

Maksimov V.P., Nefedyev V.P. The observations of a “negative burst” with high spatial resolution // *Solar Phys.* 1991. V. 136, N 2. P. 335–342. DOI: [10.1007/BF00146540](https://doi.org/10.1007/BF00146540).

Nakajima H., Yokoyama T. A nonthermal collimated ejection observed with the Nobeyama Radioheliograph // *Astrophys. J. Let.* 2002. V. 570, iss. 1. P. L41–L45. DOI: [10.1086/340832](https://doi.org/10.1086/340832).

Nakajima H., Nishio M., Enome S., et al. The Nobeyama Radioheliograph // *Proc. IEEE.* 1994. V. 82, iss. 5. P. 705–713. DOI: [10.1109/5.284737](https://doi.org/10.1109/5.284737).

Pontieu B.De., Title A.M., Lemen J.R., et al. The Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS) // *Solar Phys.* 2014. V. 289, iss. 7. P. 2733–2779. DOI: [10.1007/s11207-014-0485-y](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0485-y).

Raouafi N. E., Patsourakos S., Pariat E., et al. Solar coronal jets: Observations, theory, and modeling // *Space Sci. Rev.* 2016. V. 201, iss. 1–4. P. 1–53. DOI: [10.1007/s11214-016-0260-5](https://doi.org/10.1007/s11214-016-0260-5).

Shimojo M., Hashimoto S., Shibata K., et al. Statistical study of solar X-ray jets observed with the YOHKOH soft X-ray telescope // *Astron. Soc. of Japan.* 1996. V. 48. P. 123–136. DOI: [10.1093/pasj/48.1.123](https://doi.org/10.1093/pasj/48.1.123).

Uralov A.M., Lesovoi S.V., Zandanov V.G., et al. Dual-filament initiation of a coronal mass ejection: Observations, model // *Solar Phys.* 2002. V. 208, N 1. P. 69–90. DOI: [10.1023/A:1019610614255](https://doi.org/10.1023/A:1019610614255).

Uralov A.M., Grechnev V.V., Rudenko G.V., et al. A challenging solar eruptive event of 18 November 2003 and the causes of the 20 November geomagnetic superstorm. III. Catastrophe of the eruptive filament at a magnetic null point and formation of an opposite-handedness CME // *Solar and Stellar Astrophys.* 2014. V. 289, iss. 10. P. 3747–3772. DOI: [10.1007/s11207-014-0536-4](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0536-4).

Zirin N. The microwave brightness temperature spectrum of the quiet Sun // *Astrophys. J.* 1991. V. 370. P. 779–783.

URL: <https://sohowwww.nascom.nasa.gov> (дата обращения 23 ноября 2017 г.).

URL: <https://stereo.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 23 ноября 2017 г.).

URL: <http://badary.iszf.irk.ru> (дата обращения 23 ноября 2017 г.).

URL: <http://solar.nro.nao.ac.jp> (дата обращения 13 декабря 2017 г.).

URL: <http://www.lmsal.com/solarsoft/irisa> (дата обращения 23 ноября 2017 г.).

URL: <https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/DONKI/search> (дата обращения 15 февраля 2018 г.).

URL: <http://solar.nro.nao.ac.jp/norh/html/prominence> (дата обращения 5 марта 2018 г.).

URL: <https://hinode.isee.nagoya-u.ac.jp/ICCON> (дата обращения 23 ноября 2017 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/usu/73606> (дата обращения 23 ноября 2017 г.).

REFERENCES

Alissandrakis C.E., Kochanov A.A., Patsourkos S., Altyntsev A.T., Lesovoi S.V., Lesovaya N.N. Microwave and EUV observations of an erupting filament and associated flare and coronal mass ejections. *Publ. Astron. Soc. Japan.* 2013, vol. 65, no. SP1, article id. S8, 10 p. DOI: [10.1093/pasj/65.sp1.S8](https://doi.org/10.1093/pasj/65.sp1.S8).

Borovik V.N. Quiet Sun from multifrequency radio observations on RATAN-600. *Solar Phys.* 1994. vol. 432, pp. 185–190. DOI: [10.1007/3-540-58041-7_217](https://doi.org/10.1007/3-540-58041-7_217).

Brueckner G.E., Howard R.A., Koomen M.J., Korendyke C.M., Michels D.J., Moses J.D., Socker D.G., Dere K.P., Lamy P.L., Llebaria A., Bout M.V., Schwenn R., Simnett G.M., Bedford D.K., Eyles C.J. The Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO). *Solar Phys.* 1995, vol. 162, iss. 1–2, pp. 357–402. DOI: [10.1007/BF00733434](https://doi.org/10.1007/BF00733434).

Canfield R.C., Reardon K.P., Leka K.D., Shibata, K., Yokoyama, T., Shimojo, M. H-alpha Surges and X-ray jets in AR 7260. *Astrophys. J.* 1996, vol. 464, pp. 1016. DOI: [10.1086/177389](https://doi.org/10.1086/177389).

Covington A.E. Solar radio emission at 10.7 cm. *Royal Astron. Soc. of Canada.* 1969, vol. 63, 125 p.

Culhane J.L., Harra L.K., James A.M., et al. The EUV Imaging Spectrometer for Hinode. *Solar Phys.* 2007, vol. 243, iss. 1, pp. 19–61. DOI: [10.1007/s01007-007-0293-1](https://doi.org/10.1007/s01007-007-0293-1).

Gopalswamy N., Lara A., Yashiro S., Howard R.A. Coronal mass ejections and solar polarity reversal. *Astrophys. J. Let.* 2003, vol. 598, no. 1, pp. L63–L66. DOI: [10.1086/380430](https://doi.org/10.1086/380430).

Grechnev V.V. A method to analyze imaging radio data on solar flares. *Solar Phys.* 2003, vol. 213, iss. 1, pp. 103–110. DOI: [10.1023/A:1023213403562](https://doi.org/10.1023/A:1023213403562).

Grechnev V.V., Meshalkina N.S., Chertok I.M., et al. Relations between Microwave Bursts and near-Earth High-Energy Proton Enhancements and their Origin. *Astronomical Society of Japan.* 2013, vol. 65, iss. sp. 1. DOI: [10.1007/s11207-015-0797-6](https://doi.org/10.1007/s11207-015-0797-6).

Grechnev V.V., Uralov A.M., Chertok I.M., Slemzin V.A., Filippov B.P., Egorov Ya.I., Fainshtein V.G., Afanasyev A.N., Prestage N.P., Temmer M. A challenging solar eruptive event of 18 November 2003 and the causes of the 20 November geomagnetic superstorm. II. CMEs, shock waves, and drifting radio bursts. *Solar Phys.* 2014, vol. 289, iss. 4, pp. 1279–1312. DOI: [10.1007/s11207-013-0397-2](https://doi.org/10.1007/s11207-013-0397-2).

Grechnev V.V., Lesovoi S.V., Kochanov A.A., Uralov A.M., Altyntsev A.T., Gubin A.V., Zhdanov D.A., Ivanov E.F., Smolkov G.Ya., Kashapova L.K. Multi-instrument view on solar eruptive events observed with the Siberian Radioheliograph: From detection of small jets up to development of a shock wave and CME. *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 174, pp. 46–65. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.04.014](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.04.014).

Kaiser M.L., Kucera T.A., Davila J.M., Cyr O.C.St., Guhathakurta M., Christian E. The STEREO Mission: An Introduction. *Space Sci. Rev.* 2007, vol. 136, iss. 1–4, pp. 516.

Kundu M.R., Nindos A., Raulin J.-P., Shibasaki K., White S.M., Nitta N., Shibata K., Shimojo M. A microwave study of coronal ejecta. *Astrophys. J.* 1999, vol. 520, iss. 1, pp. 391–298. DOI: [10.1086/307454](https://doi.org/10.1086/307454).

Kundu M.R., White S.M., Garaimov V.I., Manoharan P.K., Subramanian P., Ananthakrishnan S., Janardhan P. Radio observations of rapid acceleration in a slow filament eruption / Fast coronal mass ejection event. *Astrophys. J.* 2004, vol. 607, no. 1, pp. 530–539. DOI: [10.1007/s11214-007-9277-0](https://doi.org/10.1007/s11214-007-9277-0).

Kuzmenko I.V., Grechnev V.V., Uralov A.M. A study of eruptive solar events with negative radio bursts. *Astron. Rep.* 2009, vol. 53, iss. 11, pp. 1039–1049. DOI: [10.1134/S1063772909110092](https://doi.org/10.1134/S1063772909110092).

Lesovoi S., Kobets V. Correlation plots of the Siberian Radioheliograph. *Solar-Terr. Phys.* 2017, vol. 3, no. 1, pp. 19–25. DOI: [10.12737/23588](https://doi.org/10.12737/23588).

Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Kochanov A.A., Grechnev V.V., Gubin A.V., Zhdanov D.A., Ivanov E.F., Uralov A.M., Kashapova L.K., Kuznetsov A.A., Meshalkina N.S., Sych R.A. Siberian Radioheliograph: First Results. *Solar-Terr. Phys.* 2017, vol. 3, no. 1, pp. 3–18. DOI: [10.12737/article58/96ec60/ec52.86165286](https://doi.org/10.12737/article58/96ec60/ec52.86165286).

Maksimov V.P., Nefedyev V.P. The observations of a “negative burst” with high spatial resolution. *Solar Phys.* 1991, vol. 136, no. 2, pp. 335–342. DOI: [10.1007/BF00146540](https://doi.org/10.1007/BF00146540).

Nakajima H., Yokoyama T. A nonthermal collimated ejection observed with the Nobeyama Radioheliograph. *Astrophys. J. Let.* 2002, vol. 570, iss. 1, pp. L41–L45. DOI: [10.1086/340832](https://doi.org/10.1086/340832).

Nakajima H., Nishio M., Enome S., Shibasaki K., Takano T., Hanaoka Y., Torii C., Sekiguchi H., Bushimata T., Kawashima S., Shinohara N., Irimajiri Y., Koshiishi H., Kosugi T., Shiomi Y., Sawa M., Kai K. The Nobeyama Radioheliograph. *Proc. IEEE*. 1994, vol. 82, iss. 5, pp. 705–713. DOI: [10.1109/5.284737](https://doi.org/10.1109/5.284737).

Pontieu B.De., Title A.M., Lemen J.R., Kushner G.D., Akin D.J., Allard B., Berger T., Boerner P., Cheung M., Chou C., Drake J.F., Duncan D.W., Freeland S., Heyman G.F., Hoffman C. The Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS). *Solar Phys.* 2014, vol. 289, iss. 7, pp. 2733–2779. DOI: [10.1007/s11207-014-0485-y](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0485-y).

Raouafi N. E., Patsourakos S., Pariat E., Young P.R., Sterling A.C., Savcheva A., Shimojo M., Moreno-Insertis F., DeVore C.R., Archontis V., Török T., Mason H., Curdt W., Meyer K., Dalmasse K., Matsui Y. Solar coronal jets: Observations, theory, and modeling. *Space Sci. Rev.* 2016, vol. 201, iss. 1–4, pp. 1–53. DOI: [10.1007/s11214-016-0260-5](https://doi.org/10.1007/s11214-016-0260-5).

Shimojo M., Hashimoto S., Shibata K., Hirayama T., Harvey K.L. Statistical study of solar X-ray jets observed with the YOHKOH soft X-Ray telescope. *Astron. Soc. of Japan*. 1996, vol. 48, pp. 123–136. DOI: [10.1093/pasj/48.1.123](https://doi.org/10.1093/pasj/48.1.123).

Uralov A.M., Lesovoi S.V., Zandanov V.G., Grechnev V.V. Dual-filament initiation of a coronal mass ejection: observations, model. *Solar Phys.* 2002, vol. 208, no. 1, pp. 69–90. DOI: [10.1023/A:1019610614255](https://doi.org/10.1023/A:1019610614255).

Uralov A.M., Grechnev V.V., Rudenko G.V., Myshyakov I.I., Chertok I.M., Filippov B.P., Slemzin V.A. A challenging solar eruptive event of 18 November 2003 and the causes of the 20 November geomagnetic superstorm. III. Catastrophe of the eruptive filament at a magnetic null point and formation of an opposite-handedness CME. *Solar and Stellar Astrophys.* 2014, vol. 289, iss. 10, pp. 3747–3772. DOI: [10.1007/s11207-014-0536-4](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0536-4).

Zirin N. The microwave brightness temperature spectrum of the quiet Sun. *Astrophys. J.* 1991, vol. 370, pp. 779–783.

URL: <https://sohowwww.nascom.nasa.gov> (accessed November 23, 2017)

URL: <https://stereo.gsfc.nasa.gov> (accessed November 23, 2017).

URL: <http://badary.iszf.irk.ru> (accessed November 23, 2017).

URL: <http://solar.nro.nao.ac.jp> (accessed December 13, 2017).

URL: <http://www.lmsal.com/solarsoft/irisa> (accessed November 23, 2017 г.).

URL: <https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/DONKI/search> (accessed February 15, 2018).

URL: <http://solar.nro.nao.ac.jp/norh/html/prominence> (accessed March 5, 2018).

URL: <https://hinode.isee.nagoya-u.ac.jp/ICCON> (accessed November 23, 2017).

URL: <http://ckp-rf.ru/usu/73606> (accessed November 23, 2017).

Как цитировать эту статью

Федотова А.Ю., Алтынцев А.Т., Кочанов А.А., Лесовой С.В., Мешалкина Н.С. Наблюдения эруптивных событий с помощью Сибирского радиогелиографа. *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 3. С. 17–27. DOI: [10.12737/szf-42201802](https://doi.org/10.12737/szf-42201802).